



Sofia Maria Mesquita Soares
Mestre em Georrecursos – Geotecnia

Contribuição para o Conhecimento das Características Geotécnicas dos Gabros de Beja, Faixa entre Beringel e Beja

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Geológica

Orientadora: Ana Paula F. da Silva, Professora auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de
Lisboa

Co-orientador: José Claudino de Pinho Cardoso, Professor
associado, Universidade de Aveiro

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João José Cardoso Pais

Arguente(s): Prof. Doutor Fernando Joaquim Fernandes Tavares Rocha

Prof. Doutor Victor Manuel Pissarra Cavaleiro

Vogais: Prof. Doutor José Claudino de Pinho Cardoso

Prof. Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas

Prof. Doutora Ana Paula Fernandes da Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro, 2012



Sofia Maria Mesquita Soares
Mestre em Georrecursos – Geotecnia

**Contribuição para o Conhecimento das
Características Geotécnicas dos Gabros de
Beja,
Faixa entre Beringel e Beja**

Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Geológica

Orientadora: Ana Paula F. da Silva, Professora auxiliar,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de
Lisboa

Co-orientador: José Claudino de Pinho Cardoso, Professor
associado, Universidade de Aveiro

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João José Cardoso Pais

Arguente(s): Prof. Doutor Fernando Joaquim Fernandes Tavares Rocha

Prof. Doutor Victor Manuel Pissarra Cavaleiro

Vogais: Prof. Doutor José Claudino de Pinho Cardoso

Prof. Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas

Prof. Doutora Ana Paula Fernandes da Silva



Dezembro, 2012

Contribuição para o Conhecimento das Características Geotécnicas dos Gabros de Beja, Faixa entre Beringel e Beja

Copyright© Sofia Maria Mesquita Soares, 2012

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de outra forma digital, ou por qualquer meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua própria cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de manifestar a minha gratidão a todas as pessoas e entidades cuja contribuição, direta ou indireta, para esta Tese foi particularmente importante.

O meu agradecimento muito especial aos meus orientadores: à Doutora Ana Paula Silva e ao Professor Claudino Cardoso pelo empenho e disponibilidade, pela orientação científica, pela constante motivação e amizade.

Aos restantes membros da minha Comissão de Acompanhamento, Prof. Doutor João Pais, Doutores Pedro Lamas e Tomás de Oliveira, pela orientação e colaboração, nomeadamente através do acesso a bibliografia diversa.

À mestre Rute Gomes pela troca de documentação, pela ajuda na preparação e no tratamento de dados de rochas, e por todo o apoio.

Ao colega Pedro Couceiro e à empresa Betoteste - Gabinete de Estudos de Geotecnia, Lda., pela facilidade na utilização da prensa servo-controlada para realização dos ensaios de compressão uniaxial em rochas.

À mestre Susana Gomes pela ajuda, constante apoio e amizade, que me foram imprescindíveis nos momentos menos fáceis.

Aos colegas João Matos, Diogo Teles e Ana de Jesus pela disponibilidade na cedência de informação e esclarecimento de dúvidas.

À colega Cândida Garcia, do Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território, da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, pela ajuda na obtenção das lâminas delgadas de rocha.

À colega Paula Alvarenga pela determinação da matéria orgânica nas amostras de solos.

Ao Doutor Ruben Dias, do LNEG, pelo apoio no reconhecimento de campo dos calços e informação técnica prestada.

Ao Eng.º José Francisco Santos, da Universidade de Aveiro, pelo envio do seu trabalho de investigação sobre o maciço de Beja.

Ao Eng.º Nuno Ramos pelo apoio prestado com o software AutoCAD.

À Eng.^a Filomena Mendes pela colaboração prestada no Laboratório de Solos da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja.

Ao Departamento de Geociências, da Universidade de Aveiro, na pessoa do Prof. Doutor Fernando Rocha, e das mestres Cristina Sequeira e Denise Terroso, pela realização de análises de Fluorescência de Raios X e Difração de Raios X.

Ao Departamento de Ciências da Terra, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, na pessoa do Prof. Doutor João Pais, pela utilização do equipamento do Laboratório de Geologia de Engenharia.

Ao CEGSA – Centro de Estudos de Geologia e Geotecnia de Santo André, na pessoa do Eng.^o Alberto Silva, pela informação cedida e pela preparação de alguns provetes de rocha.

Ao Instituto Geográfico Português, no âmbito do Programa de Apoio ao Fornecimento de Informação Geográfica para Investigação, Ensino e Edição – FIGIEE, pela informação geográfica cedida.

Ao Instituto Hidrográfico, Divisão de Geologia Marinha, na pessoa das Doutoradas Aurora Bizarro e Anabela Oliveira e do Mestre Joaquim Pombo pelo apoio prestado, nomeadamente na preparação de amostras para fluorescência de raios X e difração de raios X.

À empresa DST – Domingos da Silva Teixeira, S.A., pela autorização de acompanhamento do 2º Troço Adutor do Pisão – Beja, e em particular à Eng.^a Raquel Martins, pela disponibilidade em obra.

À Câmara Municipal de Beja, à AMBAAL – Associação de Municípios do Baixo Alentejo e Alentejo Litoral, na pessoa do Dr. Orlando Pereira, à EDIA - Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva, SA., ao Instituto Politécnico de Beja, na pessoa do Eng.^o Nuno Rosário e ao Conservatório Regional do Baixo Alentejo, por toda a informação técnica cedida.

À Direção da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja pela facilidade na utilização dos meios disponíveis no Laboratório de Solos.

Dedico este trabalho à minha filha, Beatriz, por todos os momentos de brincadeira de que nos privámos ao longo destes 3 últimos anos.

Resumo

O principal objetivo do presente estudo é contribuir para o conhecimento das propriedades geotécnicas das unidades que integram o perfil de meteorização dos gabros do Complexo Ígneo de Beja, na região compreendida entre Beringel e Beja.

Este conhecimento dos terrenos, rochas e solos, irá contribuir para uma adequada planificação do projeto de engenharia e da construção, e apoiar o planeamento urbano, minimizando assim os riscos geológicos associados.

Esta tese inclui uma introdução ao estado do conhecimento geológico e geotécnico dos gabros, no mundo e em Portugal, o enquadramento da área em análise e a metodologia adotada no sentido de se atingirem os resultados pretendidos.

Os trabalhos realizados, em campo e em laboratório, formam a base da caracterização dos gabros e seus solos residuais, contribuindo para a obtenção dos parâmetros definidores destas unidades.

A compilação dos dados obtidos permite individualizar três unidades geotécnicas no perfil de meteorização dos gabros, que nem sempre existem em continuidade: a zona mais profunda, ZG1, corresponde aos gabros, são ou pouco meteorizados; um trecho intermédio, ZG2, integra os solos residuais menos evoluídos, diretamente assentes na rocha mãe; e a camada mais superficial, ZG3, correspondente aos solos residuais coesivos designados de “Barros de Beja”. A Tese inclui ainda uma síntese da gama de valores para as principais propriedades geotécnicas, físicas e mecânicas, avaliadas para aquelas unidades.

Palavras-chave: Caracterização geotécnica; perfil de meteorização; gabros; solos residuais, Complexo Ígneo de Beja

Abstract

The aim of the present work is to contribute to the knowledge of the geotechnical properties of the units comprised on the weathering profile of gabbroic rocks, between Beringel and Beja.

The knowledge of rock and soil formations will contribute to the accurate engineering design and construction work, and also support urban planning and therefore minimizing geological risk.

This Thesis includes an introduction to the state of the art of the knowledge of gabbroic rocks in Portugal and around the world, their geological and geotechnical properties, description of the studied area and the methodology assumed to obtain the expected results.

Adopted field and laboratory work contributes to characterize gabbros and their respective residual soils, in order to obtain parameters that will describe these formations.

According to the data brought together, three main geotechnical units are established in the weathering profile of gabbro rocks; the deepest one, ZG1, comprises the gabbroic rocks with no or small weathering, the intermediate zone, ZG2, corresponds to soils formed *in situ*, lying directly in the parental rock and the shallow one, ZG3, to cohesive residual soils designated by “Barros de Beja”.

The resume of each geotechnical unit’s parameters will be synthetized in the conclusions of the present Thesis.

Key-words: Geotechnical characterization; weathering profile, gabbros, residual soils, Beja Igneous Complex

Índice de matérias

Agradecimentos	I
Resumo.....	III
Abstract	V
Índice de matérias	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tabelas	XVII
Lista de símbolos e notações	XXI
Lista de siglas e acrónimos	XXV
Capítulo 1- Introdução	1
1.1 Enquadramento do problema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia	4
1.4 Maciços gabróicos e perfis de meteorização	5
1.5 Caracterização geotécnica de maciços gabróicos	14
1.5.1 Métodos de estudo	16
1.5.2 Amostragem e representatividade.....	19
1.6 Informação geotécnica relativa a gabros	23
1.6.1 No mundo.....	23
1.6.2 Em Portugal	25
1.7 Estrutura da tese	27
Capítulo 2 – Materiais em estudo	29
2.1 Enquadramento geral.....	29
2.2 Enquadramento geológico e geotécnico.....	31
2.2.1 Geologia e tectónica.....	31
2.2.2 Geomorfologia.....	41
2.2.3 Hidrogeologia	43
2.2.4 Neotectónica e sismicidade.....	45

2.2.5 Informação disponível em relatórios técnicos.....	46
Capítulo 3 – Métodos de estudo	53
3.1 Caracterização de campo	53
3.1.1 Reconhecimento de superfície.....	53
3.1.2 Amostragem	60
3.2 Caracterização laboratorial	64
3.2.1 Caracterização química e mineralógica.....	67
3.2.1.1 Difração de raios X	67
3.2.1.2 Fluorescência de raios X.....	68
3.2.1.3 Análise microscópica.....	69
3.2.2 Ensaios em solos.....	70
3.2.2.1 Ensaios de identificação.....	71
3.2.2.2 Ensaios de caracterização mecânica e de compressibilidade.....	77
3.2.3 Ensaios em rocha intacta.....	82
3.2.3.1 Ensaios de caracterização física	82
3.2.3.2 Ensaios dinâmicos	84
3.2.3.3 Ensaios de caracterização mecânica	84
Capítulo 4 - Resultados obtidos e sua discussão.....	93
4.1. Reconhecimento de superfície.....	94
4.2 Caracterização química e mineralógica.....	97
4.2.1 Gabros	97
4.2.2 Solos residuais	101
4.2.3 Rocha mãe <i>versus</i> solos residuais	108
4.3 Ensaios em solos residuais	110
4.3.1 Solos do saprólito	111
4.3.2 Solos dos barros de Beja.....	114
4.3.2.1 Ensaios de identificação.....	114
4.3.2.2 Ensaios de caracterização mecânica e de compressibilidade.....	118
4.3.3 Comentário aos resultados obtidos para solos residuais.....	127
4.3.4 Correlações entre propriedades dos solos.....	130

4.4 Ensaio em rocha.....	135
4.4.1 Propriedades físicas.....	136
4.4.2 Propriedades dinâmicas	137
4.4.3 Propriedades mecânicas e de deformabilidade	138
4.4.4 Correlações entre propriedades índice dos gabros	150
4.5 Conclusões.....	156
Capítulo 5 - Considerações finais e desenvolvimentos futuros	159
5.1 Considerações finais.....	159
5.2 Desenvolvimentos futuros	165
Referências bibliográficas	167
Anexos	185

Índice de figuras

Figura 1.1 – O triângulo geotécnico – os aspetos distintos mas interligados da Geotecnia.....	4
Figura 1.2 – Metodologia geral aplicada no presente trabalho de investigação	5
Figura 1.3 – Classificação das rochas gabróicas	6
Figura 1.4 – Relação entre a penetração da meteorização química e o tipo de clima	9
Figura 1.5 – A série de estabilidade dos minerais de Goldich.....	9
Figura 1.6 – Perfil de meteorização de rochas basálticas, Brasil Central, em clima húmido e temperatura moderada.....	10
Figura 1.7 - Perfil de um solo residual: uma comparação entre as classificações pedológica e geotécnica	12
Figura 1.8 - Esquema genérico da metodologia adotada na caracterização geotécnica de terrenos ..	17
Figura 1.9 – Amostragem superficial de solo, não perturbada, por talhe de blocos	22
Figura 2.1 – Localização geográfica da área em estudo.....	30
Figura 2.2 – Infografia do enquadramento da área em estudo no limite da ZOM.	32
Figura 2.3 - Infografia da legenda para as rochas magmáticas intrusivas e filonianas, nas quais se enquadra o CIB.	32
Figura 2.4 - Coluna litológica sintética do setor Ferreira do Alentejo – Beringel, do compartimento ocidental da SGB	36
Figura 2.5 – Infografia da cartografia geológica do sector Ferreira do Alentejo – Beringel, compartimento ocidental da SGB	37
Figura 2.6 – Infografia da carta geológica de Portugal, folha 8.....	38
Figura 2.7 – Infografia da carta geológica de Beja	40
Figura 2.8 – Vista do vale da falha Odemira- Ávila.....	41
Figura 2.9 – Infografia do mapa morfológico do Alentejo	42
Figura 2.10 – Infografia do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja.....	44
Figura 2.11 – Perfil de meteorização de um gabro-diorito do CIB e respetivo comportamento hidráulico.....	45
Figura 2.12 – Infografia do zonamento sísmico em Portugal Continental.....	46
Figura 2.13 – Infografia de extrato da Carta Neotectónica de Portugal Continental	46
Figura 2.14 – Esboço da distribuição espacial dos locais envolvidos nos estudos dos relatórios consultados para a área em investigação	47
Figura 2.15 – Distribuição dos valores do peso volúmico seco máximo e do teor em água ótimo para ensaios realizados pela autora	51

Figura 3.1 – Aspeto de zonas argilificadas e zonas mineralizadas, Colina do Carmo, N38°01,683', W007°51,064'	54
Figura 3.2 - Pormenor de filonete mineralizado – hematite; Colina do Carmo, N38°01,671', W007°51,086'	55
Figura 3.3 - Detalhe de zona mineralizada - hematite e provável malaquite, Colina do Carmo, N38°01,683', W007°51,064'	55
Figura 3.4 - Pormenor de filão de pegmatito no caminho-de-ferro junto à localidade de Penedo Gordo, N37°59,439', W007°54,727'	56
Figura 3.5 - Pormenor de pegmatito de leucogabro na transição para o COBA, linha caminho-de-ferro junto ao vértice geodésico do Cerejo, N37°57,814, W007°52,976'	56
Figura 3.6 – Granodioritos (microgranodioritos) na Colina do Carmo, N38°01,683', W007°51,064' ...	56
Figura 3.7 - Diorito orientado junto ao vértice geodésico do Cerejo, N37°59,655', W007°53,689'	57
Figura 3.8 – Exemplo de ficha elaborada a partir da recolha de dados no campo, aplicada ao local designado de “Tanque dos Cavalos”	59
Figura 3.9 - Exemplo de obras de engenharia civil visitadas no âmbito do levantamento de terreno.	60
Figura 3.10 – Exemplos de dois locais de recolha de amostras (Barros de Beja)	62
Figura 3.11 – Exemplos de recolhas de amostras (Barros de Beja)	62
Figura 3.12 – Exemplos da colheita de amostra não alteradas e preparação de provete para ensaio	62
Figura 3.13 – Locais selecionados para recolha de amostras de rocha	63
Figura 3.14 – Aspeto geral da distribuição espacial dos pontos de amostragem na área investigada, em base topográfica	64
Figura 3.15 – Relação entre o número de amostras ensaiadas e os ensaios realizados em solos	66
Figura 3.16 – Relação entre o número de provetes ensaiados e os ensaios realizados em rocha	67
Figura 3.17 – Esquema representativo da duração dos procedimentos de realização dos ensaios de análise granulométrica e densidade das partículas	71
Figura 3.18 – Aspetos dos dispositivos utilizados para a análise granulométrica segundo LNEC E196 – 1966	74
Figura 3.19 – Determinação do valor do limite de liquidez de um solo	75
Figura 3.20 – Ensaio de retração linear	77
Figura 3.21 – Parâmetros definidores da compressibilidade do solo no diagrama $\log \sigma'$ -e	78
Figura 3.22 – Equipamento utilizado no ensaio edométrico	79
Figura 3.23 – Determinação dos parâmetros de resistência a partir dos resultados do ensaio de corte direto	80
Figura 3.24 – Ensaio de corte direto	81
Figura 3.25 – Posição de três provetes de gabro na base da mesa basculante	85

Figura 3.26 – Posição de três provetes de gabro na base da mesa basculante, durante um ensaio ...	86
Figura 3.27 – Realização do ensaio de dureza ao ressalto em blocos <i>in situ</i>	87
Figura 3.28 – Equipamento de resistência à compressão pontual	88
Figura 3.29 – Determinação gráfica dos módulos de elasticidade.....	90
Figura 3.30 – Curva tensão – deformação, obtida no ensaio de RCU	91
Figura 3.31 – Proвете com cerca de 138 mm de altura aproximada colocado na prensa cervo-controlada	91
Figura 4.1 – Representação estereográfica dos principais planos de descontinuidades presentes nos levantamentos de campo da área em estudo, <i>software</i> Dips da Rocscience.....	94
Figura 4.2 – Esboço da cartografia litológica sumária elaborada para a área em estudo	96
Figura 4.3 – Difrátograma correspondente ao gabro da amostra 31	100
Figura 4.4 – Difrátograma correspondente ao gabro da amostra 32	101
Figura 4.5 – Difrátograma correspondente ao solo residual da amostra 14 (saprólito).....	102
Figura 4.6 – Difrátograma correspondente ao solo residual da amostra 18, no estado natural	103
Figura 4.7 – Difrátograma correspondente ao solo residual da amostra 18, aquecida a 500°C	103
Figura 4.8 – Difrátograma correspondente ao solo residual da amostra 18, glicolada	104
Figura 4.9 - Proposta de classificação da expansibilidade em função da capacidade de troca catiónica e do limite de liquidez onde se projetam os resultados médios para os barros de Beja.....	107
Figura 4.10 – Resumo da classificação geotécnica do conjunto de solos ensaiados	111
Figura 4.11 – Aspeto geral do saprólito do gabro	112
Figura 4.12 – Curvas granulométricas de amostras de solos do saprólito.....	112
Figura 4.13 – Aspetos dos barros de Beja – no local de recolha da amostra 20.....	115
Figura 4.14 – Curvas granulométricas dos Barros de Beja	115
Figura 4.15 - Diagrama da variação da tensão efetiva vertical <i>versus</i> índice de vazios, para os cinco ensaios realizados	120
Figura 4.16 - Gráfico relativo ao ensaio de corte direto, com a projeção das 3 amostras ensaiadas.	123
Figura 4.17 – Encamisamento da amostra para ensaio de expansibilidade com redução da altura inicial	125
Figura 4.18 – Exemplo dos resultados obtidos para a variação da expansibilidade livre até 7,5 kPa de carga, ao longo das 72 h de duração do ensaio, para a amostra 22.....	126
Figura 4.19 – Exemplo da variação da deformação (expansibilidade) em função da tensão vertical aplicada	126
Figura 4.20 - Comparação entre os valores do teor em água natural dos dois tipos de solos	127
Figura 4.21 - Comparação entre os valores obtidos para a densidade das partículas dos dois tipos de solos.....	128

Figura 4.22 - Comparação entre os valores obtidos para o limite de liquidez dos dois tipos de solos	128
Figura 4.23 - Comparação entre os valores obtidos para o índice de plasticidade dos dois tipos de solos.....	129
Figura 4.24 – Comparação entre os valores para a retração linear dos dois tipos de solos	129
Figura 4.25 - Comparação entre a retração linear do saprólito e dos barros de Beja	130
Figura 4.26 – Correlação entre o limite de liquidez e o índice de plasticidade para o saprólito	131
Figura 4.27 – Correlação entre o limite de liquidez e o índice de plasticidade para os barros de Beja	131
Figura 4.28 – Projeção, na carta de plasticidade de Casagrande, dos valores registados para o saprólito e para os barros de Beja.....	132
Figura 4.29 – Correlação entre a fração argila e o índice de plasticidade para os barros de Beja	132
Figura 4.30 – Correlação entre a fração argila e o índice de plasticidade para saprólito	133
Figura 4.31 – Posição das amostras de barros de Beja e do saprólito no gráfico de correlação entre a fração argila e o índice de plasticidade para os barros de Beja	133
Figura 4.32 – Correlação entre o limite de retração linear e o índice de plasticidade para o saprólito	134
Figura 4.33 – Correlação entre o limite de retração linear e o índice de plasticidade para os barros de Beja	134
Figura 4.34 – Correlação entre o índice de compressibilidade e o limite de liquidez para os barros de Beja.....	135
Figura 4.35 – Distribuição dos valores obtidos para cada grupo de amostras ensaiado para resistência ao ressalto	140
Figura 4.36 – Distribuição dos valores obtidos para a resistência à compressão pontual	141
Figura 4.37 – Distribuição dos valores obtidos para a resistência à tração indireta.....	142
Figura 4.38 – Gráfico tensão-extensão para todos os provetes da amostra 31	145
Figura 4.39 – Gráfico tensão-extensão para todos os provetes da amostra 32 (W_1)	145
Figura 4.40 – Gráfico tensão-extensão para todos os provetes da amostra 32 (W_2)	146
Figura 4.41 – Comparação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático	146
Figura 4.42 – Comparação entre os coeficientes de Poisson dinâmico e estático	147
Figura 4.43 – Comparação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático	147
Figura 4.44 – Comparação entre os coeficientes de Poisson dinâmico e estático para a amostra 32 (W_1).....	148
Figura 4.45 – Comparação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático para a amostra 32 (W_2).....	148

Figura 4.46 – Comparação entre os coeficientes de Poisson dinâmico e estático para a amostra 32 (W_2).....	148
Figura 4.47 – Gráfico de correlação entre a porosidade efetiva e a resistência à compressão uniaxial	151
Figura 4.48 – Gráfico de correlação entre a porosidade efetiva e a velocidade de propagação das ondas P	152
Figura 4.49 – Gráfico de correlação entre a RCU e a RTB	153
Figura 4.50 – Gráfico de correlação entre a RCU e a resistência à compressão pontual	153
Figura 4.51 – Gráfico de correlação entre a resistência à tração indireta e a resistência à compressão pontual	154
Figura 4.52 – Gráfico de correlação entre a RCU e a dureza ao resalto do ensaio com esclerómetro tipo L.....	154
Figura 4.53 - Gráfico de correlação entre o módulo de elasticidade (E_{tg}) e a RCU	155
Figura 4.54 - Posição dos provetes de gabra ensaiados no gráfico de correlação entre o módulo de elasticidade (E_{tg}) e a RCU segundo Deere, 1996	155
Figura 5.1 – Perfil de meteorização proposto para os gabros de Beja, na faixa entre Beringel e Beja, com as características geotécnicas determinadas para cada unidade.	160
Figura 5.2 – Envolvente dos fusos granulométricos obtidos para os solos residuais.	161

Índice de tabelas

Tabela 1.1 – Algumas intrusões gabróicas bandadas importantes na Terra: geometria, idade e enquadramento tectónico	7
Tabela 1.2 – Comparação entre algumas descrições de perfil de meteorização de solos residuais de rochas ígneas.....	13
Tabela 1.3 - Resumo dos índices de meteorização utilizados mais frequentemente em rochas ígneas.	18
Tabela 1.4 – Erros associados a amostragem e ensaios.....	23
Tabela 1.5 – Resumo da gama de valores para alguns parâmetros geotécnicos de gabros.....	23
Tabela 1.6 – Valores de alguns parâmetros mecânicos para gabros na Grécia, Índia e Sudão	24
Tabela 1.7 – Valores de propagação das ondas sísmicas P e S obtidos em gabros da Índia e do Sudão	24
Tabela 1.8 - Excerto das unidades geotécnicas definidas na Carta Geotécnica da Área de Sines relacionadas com o Maciço de Sines.....	25
Tabela 1.9 - Resumo da gama de valores dos parâmetros geotécnicos definidos para o Complexo R ₅	26
Tabela 1.10 - Resumo da gama de valores dos principais parâmetros geotécnicos definidos para o Complexo S ₃	26
Tabela 1.11 – Resumo dos teores em óxidos de elementos maiores, expressas em percentagem de peso, presentes em amostras de gabros portugueses provenientes do CIB e de Sines.....	26
Tabela 2.1 – Resumo das principais características microscópicas dos gabros entre Odivelas e Beringel	34
Tabela 2.2 – Síntese dos resultados dos ensaios de identificação em solos dos relatórios consultados	48
Tabela 2.3 – Resumo dos resultados dos ensaios de compactação, Proctor modificado, de um dos relatórios consultados.....	49
Tabela 2.4 – Exemplo de valores estimados para alguns parâmetros geotécnicos - peso volúmico, ângulo de atrito interno e coesão em tensões efetivas e módulo de deformabilidade	51
Tabela 2.5 – Resumo dos resultados dos ensaios de compactação Proctor modificado.....	51
Tabela 2.6 - Valores de caracterização dos inertes de gabo para fins comerciais.....	52
Tabela 3.1 – Listagem geral dos ensaios realizados e procedimentos normalizados adotados	65
Tabela 3.2 – Classificação dos solos quanto à sua categoria e potencial de expansibilidade a partir dos valores da retração linear.....	77
Tabela 4.1 – Descrição macroscópica dos gabros em estudo.....	97

Tabela 4.2 – Descrição microscópica dos gabros em estudo	98
Tabela 4.3 – Composição química das amostras do gabro são (W_1), em percentagem modal	100
Tabela 4.4 – Composição química de três amostras de solos residuais em percentagem modal	102
Tabela 4.5 – Posições referentes aos picos principais dos minerais de argilas em amostras com diferentes tratamentos	104
Tabela 4.6 – Semi quantificação, em percentagem, dos minerais presentes na fração argilosa de três amostras de barros de Beja ensaiadas	105
Tabela 4.7 – Valores dos catiões de potássio, sódio, magnésio e cálcio, das amostras de solos residuais - barros de Beja – ensaiadas	106
Tabela 4.8 – Valores dos elementos potássio, sódio, magnésio e cálcio para solos residuais da região de Beja, designados de barros pretos - Bp.....	106
Tabela 4.9 – Capacidade de troca catiónica para as amostras de solos dos barros de Beja	106
Tabela 4.10 – Valores de capacidade de troca catiónica	107
Tabela 4.11 – Matéria orgânica determinada para as amostras de solos dos barros de Beja	108
Tabela 4.12 – Distribuição, em profundidade, da composição química média das amostras analisadas	108
Tabela 4.13 - Resumo dos índices de meteorização, mais comuns, aplicados às amostras de gabro	109
Tabela 4.14 - Resumo dos índices de meteorização, mais comuns, aplicados aos solos residuais	109
Tabela 4.15 – Parâmetros geotécnicos determinados para o saprólito, e respetiva classificação geotécnica	113
Tabela 4.16 – Gama de valores de alguns parâmetros geotécnicos determinados para o saprólito .	114
Tabela 4.17 – Parâmetros geotécnicos determinados para os solos dos barros de Beja e respetiva classificação geotécnica	117
Tabela 4.18 – Resumo dos parâmetros geotécnicos determinados para os solos dos barros de Beja	118
Tabela 4.19 – Resultados obtidos nos ensaios edométricos realizados em amostras dos barros de Beja	118
Tabela 4.20 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios edométricos realizados em amostras dos barros de Beja	121
Tabela 4.21 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios edométricos em provetes dos barros de Beja para os últimos escalões de carregamento.....	122
Tabela 4.22 - Resumo dos parâmetros de realização do ensaio de corte, exemplo da amostra 20 ..	123
Tabela 4.23 - Resultados finais dos valores obtidos nos ensaios de expansibilidade vertical livre, para os barros de Beja	124

Tabela 4.24 - Resumo dos resultados dos ensaios de peso volúmico e porosidade, realizados nas amostras 31 e 32	136
Tabela 4.25 - Resumo dos resultados dos ensaios de determinação do teor em água, realizados nas amostras 31 e 32	137
Tabela 4.26 - Resumo dos resultados de velocidades dos ensaios de ultrassons realizados	137
Tabela 4.27 - Resumo dos resultados calculados para os parâmetros elásticos dinâmicos	138
Tabela 4.28 - Resumo dos resultados dos ensaios de determinação do ângulo de atrito básico	138
Tabela 4.29 - Resumo dos resultados dos ensaios de dureza ao ressaltos realizados nas várias amostras	139
Tabela 4.30 - Resumo dos resultados da resistência à compressão pontual	141
Tabela 4.31 - Resumo dos resultados da resistência à tração brasileiro	142
Tabela 4.32 - Resumo dos resultados da resistência à compressão uniaxial	143
Tabela 4.33 - Resumo dos resultados da determinação dos módulos de elasticidade estáticos	144
Tabela 4.34 - Resumo dos resultados da determinação dos coeficientes de Poisson	144
Tabela 4.35 – Estimativa grosseira do ângulo de atrito interno (φ) com base na inclinação das superfícies de rotura (β) com o plano horizontal	150
Tabela 4.36 – Valores médio, máximo e mínimo, determinados para o ângulo de atrito interno do material rochoso	150
Tabela 5.1 - Síntese das propriedades dos gabros na faixa Beringel-Beja	162
Tabela 5.2 - Síntese das propriedades dos solos residuais dos gabros na faixa Beringel-Beja	163
Tabela 5.3 - Correlações obtidas para alguns dos ensaios realizados e respetivos coeficientes de correlação	164

Lista de símbolos e notações

β - ângulo de inclinação das superfícies de rotura dos provetes de rocha

ε - deformação

ϕ_b - ângulo de atrito de descontinuidades

γ - peso volúmico

γ_d - peso volúmico seco

γ_i - peso volúmico inicial

ϕ - ângulo de atrito interno ou de resistência ao corte

ϕ' - ângulo de atrito interno ou de resistência ao corte em tensões efetivas

ν - coeficiente de *Poisson*

ν_d - coeficiente de *Poisson* dinâmico

σ - tensão

σ'_v - tensão efetiva vertical

σ_c - resistência à compressão uniaxial

σ_t - resistência à tração

τ - tensão de corte

$\mu\varepsilon$ - micro extensão

A - área

A_t - Atividade da argila

A_v - coeficiente de compressibilidade

c - coesão

C_c - índice de compressibilidade

C_r - índice de recompressibilidade

c' – coesão em tensões efetivas

c_u – resistência não drenada

c_v – coeficiente de consolidação

Cu – símbolo químico do elemento cobre

D – diâmetro

e – índice de vazios

e_0 – índice de vazios inicial

E – módulo de *Young* ou módulo de elasticidade

E_d - módulo de *Young* ou módulo de elasticidade dinâmico

E_{oed} – módulo de deformabilidade volumétrica do solo

E_{sec} - módulo de *Young* ou módulo de elasticidade secante

E_{tg} - módulo de *Young* ou módulo de elasticidade tangente

E_{xp} - Expansibilidade

G_s – densidade das partículas sólidas

h – altura

h_0 – altura inicial

h_f – altura final

Δh – variação de espessura

I_c – índice de consistência

I_p – índice de plasticidade

I_s – índice de compressão pontual

I_{s50} – índice de compressão pontual normalizado

k – coeficiente de permeabilidade

L_s – retração linear

P – porosidade

P_e – porosidade aparente ou efetiva

ppm - partes por milhão

R – *Ruxton ratio*

R_L – dureza ao ressalto

S – grau de saturação

V_p – velocidade de propagação das ondas sísmicas primárias ou longitudinais

V_s - velocidade de propagação das ondas sísmicas secundárias ou transversais

w – teor em água

W – grau de meteorização/escala de meteorização

w_L – limite de liquidez

w_{nat} – teor em água natural

w_{opt} – teor ótimo de água

w_p – limite de plasticidade

Lista de siglas e acrónimos

AENOR – *Asociación Española de Normalización y Certificación*

ASTM – *American Society of Testing Materials*

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

BGD – *Basic Geotechnical Description*

BSI – *British Standards Institution*

CEC – *Cation Exchange Capacity* (Capacidade de troca catiónica)

CEGSA – Centro de Estudos de Geologia e Geotecnia de Santo André

CEN – *Comité Européen de Normalisation*

CIA – *Chemical index of alteration*

CIB – Complexo Ígneo de Beja

CIW – *Chemical index of weathering*

COBA – Complexo ofiolítico de Beja – Acebuches

ESTIG – Escola Superior de Tecnologia e Gestão

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

IAEG – *International Association for Engineering Geology and the Environment*

IGM – Instituto Geológico e Mineiro

IP8 – Itinerário principal nº 8

IPBeja – Instituto Politécnico de Beja

IPQ – Instituto Português da Qualidade

ISO – *International Standards Organization*

ISRM – *International Society of Rock Mechanics*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

LOI – *Lost on ignition* / perda ao rubro

Ma – Milhões de anos

NX – Nicóis cruzados

Nparal – Nicóis paralelos

N121 – Estrada Nacional nº 121

NP – Norma portuguesa

PIA – *Plagioclase index of alteration*

PLT – Point load test

PUNDIT – *Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indication Tester*

PWI – *Product of weathering index*

RCU – Resistência à compressão uniaxial

RMR – *Rock Mass Rating*

RTB – Resistência à tração indireta (ensaio brasileiro)

SGB – Sequência Gabróica Bandada

SGP – Serviços Geológicos de Portugal

STI – *Silica titanium index*

UNL – Universidade Nova de Lisboa

USCS – *Unified Soil Classification System*; Classificação Unificada de Solos

V – *Vogt residual index*

WIP – *Weathering index Parker*

ZOM – Zona de Ossa Morena

ZSP – Zona Sul Portuguesa

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento do problema

O presente trabalho visa contribuir para o conhecimento das características geotécnicas dos gabros hercínicos, 345 a 335 Ma (Jesus *et al.*, 2007), pertencentes à Sequência Gabróica Bandada (SGB) do Complexo Ígneo de Beja (CIB), e dos terrenos associados ao seu perfil de meteorização, numa faixa compreendida entre a localidade de Beringel e a cidade de Beja.

O conhecimento do perfil de meteorização das rochas gabróicas, bem como das propriedades geotécnicas dos gabros e dos solos residuais destes derivados, não tem sido objeto de intensa divulgação bibliográfica. Para este facto contribui a escassez de afloramentos de gabros, pouco abundantes na crosta continental onde se encontram apenas em algumas intrusões, embora constituam uma grande percentagem da crosta oceânica. Consequentemente, não existem muitas obras geotécnicas que intercetem estes materiais.

Em Portugal, para além dos gabros abrangidos nesta investigação, é possível encontrar litologias semelhantes nos maciços de Morais e Bragança, com maior representatividade neste último, na região de Portalegre, inseridos no Complexo Básico de Alter do Chão – Cabeço de Vide, e em Sines e Sintra, prolongando-se até Mafra e Nazaré (S. Brás), sendo estes últimos menos importantes em termos de área aflorante. Os designados gabros de Sines, mais recentes em idade que os da SGB, com cerca de 73 Ma (Cretácico superior), (Canilho, 1972) e (Canilho, 1989), têm representatividade cartográfica relevante e devido às importantes obras de engenharia naquela região, de que é exemplo o Porto de Sines, têm sido alvo de estudos geotécnicos detalhados, particularmente no âmbito da caracterização empreendida para a Carta Geotécnica de Sines (LNEC, 1974). A exploração industrial destas litologias numa das maiores pedreiras portuguesas, para obtenção de agregados e blocos de grandes dimensões que têm sido aplicados em proteção portuária, também contribuiu para a maior disponibilização de dados geotécnicos sobre os gabros deste maciço, comparativamente aos outros em Portugal (Oliveira *et al.*, 1978).

Pode assim presumir-se que as rochas gabróicas, em comparação com outros tipos litológicos, por exemplo graníticos, e dada a sua escassa representatividade em Portugal e no mundo, não se

encontram tão bem estudadas e caracterizadas, constituindo a presente Tese um contributo para ampliar o seu conhecimento do ponto de vista geotécnico.

Para além disso, os solos residuais destas litologias também não se encontram tão bem caracterizados como os solos graníticos, particularmente ao analisar-se a abundância de estudos publicados sobre estes últimos, nomeadamente em Portugal onde se encontram implantadas importantes áreas metropolitanas. Salientam-se, a título de exemplo, a carta geotécnica (Oliveira & Gomes, 2003) e os trabalhos de (Duarte, 2002) e (Viana da Fonseca, 1996). Este último autor refere que os solos residuais são mais abundantes e representativos, à escala global, do que os solos transportados. Podem citar-se, como exemplo, os maciços ígneos e respetivas coberturas eluvionares que afloram em regiões tropicais a subtropicais, como é o caso do Brasil, Malásia e certas regiões da China, nomeadamente Hong Kong. Contudo, os solos transportados estão mais bem estudados, pois têm mais relevância nas regiões mais desenvolvidas do hemisfério norte. O mesmo autor (*ib.*) menciona ainda que os solos residuais colocam problemas menos delicados do que os associados às argilas moles ou às areias soltas dos solos transportados. No entanto, existem alguns solos residuais, nomeadamente os resultantes de maciços ígneos básicos ou ultrabásicos, onde as argilas presentes, geralmente do grupo da montmorilonite, dada a sua atividade, podem induzir situações geotécnicas mais complexas, nomeadamente devido à sua variação significativa de volume dependente de variações no respetivo teor em água e associadas ainda, às vezes, a fenómenos de fluência.

Muitos dos dados relativos à caracterização geotécnica de rochas e/ou solos associados ao CIB na área em referência são recentes, datando das últimas décadas, não se encontrando publicados uma vez que resultam de estudos de caracterização geotécnica efetuados para novas obras de engenharia, tais como as barragens inseridas no empreendimento de Alqueva, nomeadamente Pisão e Cinco Reis e o aeroporto de Beja. A informação constante nestes relatórios é específica, interessando maioritariamente a caracterização de solos e, menos frequentemente, de rochas.

1.2 Objetivos

O desenvolvimento, que se pretende sustentado, é sinónimo de uma gestão adequada dos recursos naturais aliada à preservação do meio, sendo o contributo da engenharia geológica essencial à avaliação das características e aptidões dos terrenos e à modelação geotécnica subjacente ao dimensionamento das estruturas de engenharia que neles se pretendem implantar.

Particularmente em ambientes urbanos e em especial na região de Beja, os desenvolvimentos dos trabalhos de engenharia civil, nomeadamente escavações e fundações, afetam pequenas

profundidades, importando por isso conhecer adequadamente o perfil de meteorização dos terrenos sobre o qual se está a planear construir.

O conhecimento da gama de valores das propriedades dos terrenos permite um dimensionamento eficiente das estruturas, garantindo a sua qualidade, economia e segurança. A disponibilização em formato digital dos dados relativos aos diferentes geomateriais e aos parâmetros que os caracterizam contribuem para a realização de cartas temáticas, nomeadamente cartas de aptidão, contribuindo igualmente para um ordenamento eficiente e tendencialmente sustentado.

As metas que se pretendem atingir com a presente investigação traduzem as necessidades de superar dificuldades encontradas no nível do conhecimento geotécnico relativo à região, e que se sintetizam nos objetivos seguintes:

- Contribuir para a caracterização geotécnica dos gabros da SGB, nomeadamente na região entre Beringel e Beja;
- Disponibilizar a informação geotécnica associada ao seu perfil de meteorização.

Adicionalmente, pretende-se contribuir para promover a melhoria dos projetos geológico – geotécnicos, bem como a sua adequação aos terrenos onde se inserem e sensibilizar o município de Beja, e outras entidades decisoras regionais, para a importância da caracterização geotécnica no projeto final, e a disponibilização de geodados para qualquer desenvolvimento que necessite das propriedades dos terrenos afetados, permitindo dimensionar com mais economia sem menosprezar a segurança e, simultaneamente, em harmonia com o meio físico. Pretende-se assim sublinhar a importância do triângulo geotécnico (figura 1.1) e das diversas interações que encerra, disponibilizando dados de caracterização e comportamento do maciço gabróico, entre Beringel e Beja.

Acrescenta-se a esta lista de objetivos, genéricos e concretizáveis, um outro, pessoal, resultado do processo de investigação, que se resume no querer responder às questões entretanto suscitadas pelos levantamentos de campo e pelos ensaios laboratoriais realizados pela autora no âmbito do seu trabalho no Instituto Politécnico de Beja, que demonstram características particulares das rochas e solos em referência que podem, no seu conjunto, interagir com as edificações e que interessa conhecer e explicar.

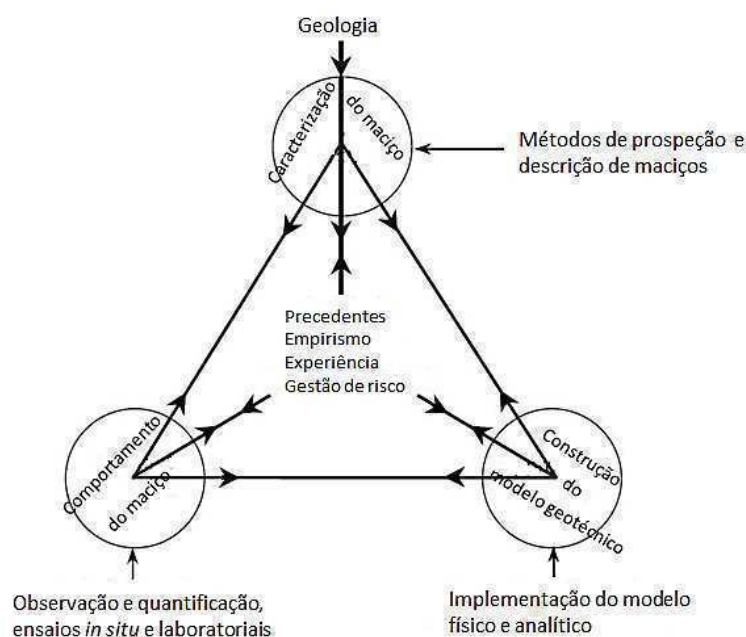


Figura 1.1 – O triângulo geotécnico – os aspetos distintos mas interligados da Geotecnia, modificado de (Morgenstern, 2000).

1.3 Metodologia

Nesta Tese pretende-se igualmente contribuir para o conhecimento das propriedades geomecânicas dos terrenos que constituem o perfil tipo da Sequência Gabróica Bandada, acrescentando parâmetros com relevância geotécnica. E sendo esta no âmbito da engenharia geológica, as propriedades geotécnicas a determinar irão ainda constituir fonte de informação para futuras aplicações em engenharia civil.

São analisados vários perfis de meteorização desde a rocha mãe, o gabro, até aos solos residuais que a recobrem, efetuando-se a sua caracterização geotécnica preliminar. Os terrenos em análise dividem-se assim em duas unidades distintas, do ponto de vista geotécnico: os gabros *sensu lato* (s.l.), as rochas que integram maioritariamente a SGB, e os respetivos solos residuais, uns finos outros grosseiros, pelo que o estudo abrange ensaios de caracterização de campo e/ou em laboratório no âmbito das mecânicas das rochas e dos solos.

A metodologia de trabalho genérica adotada encontra-se ilustrada na figura 1.2 e está detalhada nos capítulos subsequentes desta Tese, bem como os resultados obtidos.

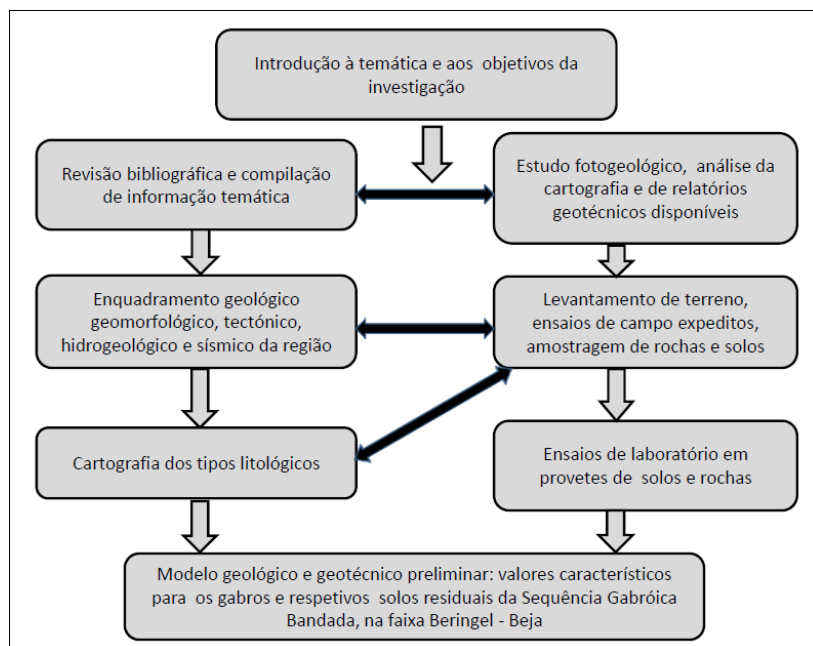


Figura 1.2 – Metodologia geral aplicada no presente trabalho de investigação

Estando embora prevista a edição de cartografia geológica à escala 1/50.000 para os próximos anos, a área em estudo encontra-se atualmente coberta apenas pela carta geológica à escala 1/200.000 (Oliveira - Coordenação, 1992), sendo esta a maior escala publicada, e que foi a utilizada preliminarmente como referência de base, nos trabalhos de campo.

Ainda no âmbito da metodologia adotada, foram seguidas as normas e recomendações de entidades de referência, no âmbito da Geotecnia, nomeadamente a Associação Internacional de Geologia de Engenharia e do Ambiente (IAEG), a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM), a Sociedade Americana para Ensaios e Materiais (ASTM), o Comité Europeu de Normalização (CEN) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), entre outras, que serão referidas aquando da descrição dos ensaios realizados.

1.4 Maciços gabróicos e perfis de meteorização

A designação de gabro foi proposta em 1768, e deriva do termo latino *gaber* que significa macio. Os gabros são rochas plutónicas, melanocratas, de textura grosseira, composição básica, constituídas essencialmente por plagioclase cálcica - da labradorite à anortite, e piroxena - augite e/ou hiperstena. Podem ainda conter olivina, hornblenda, biotite e quartzo em pequena percentagem e como minerais acessórios podem apresentar apatite, granada, magnetite e ilmenite. Como modo de ocorrência podem constituir grandes lopólitos ou estruturas em anel (*ring dykes*) como acontece na

serra de Sintra (Mafra) e em Sines. Em Portugal, para além dos exemplos já referidos (página 1), ainda podem encontrar-se gabros na Nazaré e na região de Braga (Galopim de Carvalho, 2002), este último com escassa expressão cartográfica.

De entre os vários tipos de gabros, que se caracterizam por diferentes composições mineralógicas (figuras 1.3), salientam-se aqui as terminologias associadas à SGB, tais como gabro olivínico, gabro piroxénico ou gabro hornebléndico. Referência também importante é o termo gabrodiorito, que ilustra o facto de coexistirem na mesma área estes dois tipos litológicos, devido a variações a nível da composição, sendo que nuns locais a rocha se revela como um diorito e noutros como um gabro. Os dioritos são rochas intermédias, granulares, melanocratas a mesocratas, e essencialmente constituídas por plagioclase sódico-cálcica, normalmente andesina, mas também podendo ser oligoclase, e um ou mais tipos de minerais ferromagnesianos geralmente horneblenda, mas também augite e/ou biotite. O quartzo pode estar presente até cerca de 10% e o feldspato alcalino, albite, ortoclase ou microclina, até cerca de 30% da totalidade dos feldspatos. São comuns em zonas marginais associadas a gabros, rochas como granodioritos e, mais raramente, sienitos (Galopim de Carvalho, *op. cit.*) que também existem no CIB (Santos, 1990).

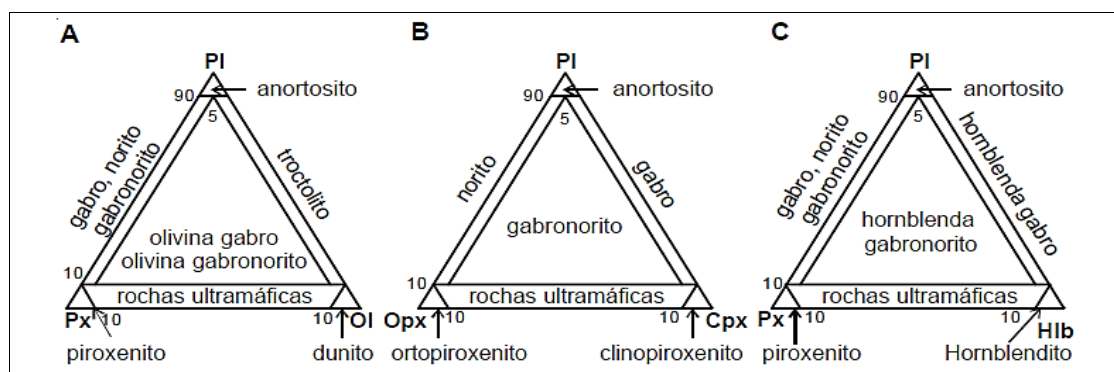


Figura 1.3 – Classificação das rochas gabróicas: A- Diagrama Plagioclase (PI), Piroxena (Px) e Olivina (Ol); B- Diagrama Plagioclase, Ortopiroxena (Opx) e Clinopiroxena (Cpx); C – Diagrama Plagioclase, Piroxena e Horneblenda (Hlb), modificado de (Streckeisen, 1976)

O termo gabróico é assim entendido como uma rocha intrusiva de granulometria grosseira e de afinidade com o gabro. Inserem-se neste grupo os noritos, gabronoritos, troctólitos e anortositos (Gill, 2010). As intrusões de rochas gabróicas parecem exibir alguma variedade de geometrias dependendo da dimensão da intrusão (Tabela 1.1), representando oportunidades de estudo dos sistemas magmáticos e a compreensão do controlo do transporte e evolução dos magmas (*op. cit.*).

Nesse sentido interessa conhecer a estrutura e forma da intrusão e verifica-se que muitas delas, com dimensão de algumas centenas de metros (*ib.*), apresentam bandado magmático (*layering*). Este

representa uma repetição, mais ou menos planar, de camadas centimétricas a métricas, com diferente composição químico-mineralógica, que resulta de um processo de seriação mineral durante a cristalização e deposição magmáticas.

Recorrendo ao exemplo da intrusão gabróica de Skærgaard na Gronelândia (Tabela 1.1), Gill (*op. cit.*) ilustra a relação entre a textura da rocha e a sua localização dentro da câmara magmática; texturas mais aplíticas junto aos bordos da intrusão, onde o arrefecimento é mais rápido, e texturas grosseiras para o respetivo interior. No entanto, a textura não depende apenas do arrefecimento e, junto às margens da intrusão de Skærgaard, podem-se encontrar gabros de textura pegmatítica, com cristais de grandes dimensões (> 15 mm). Estes pegmatitos devem provavelmente refletir a infiltração no magma de vapor de água das paredes, junto ao encaixante (*ib.*).

Tabela 1.1 – Algumas intrusões gabróicas bandadas importantes na Terra: geometria, idade e enquadramento tectónico, modificado de (Gill, 2010)

Geometria da intrusão	Exemplo	Idade (Ma)	Enquadramento tectónico
Em forma de funil	Skærgaard, E Gronelândia	55	Pluma associada a margem passiva
Lopólito	Kiglapait, Labrador	1300	Anorogénico
	Fongen-Hyllingen, Noruega	430	Sinorogénico
	Bushveld, África do Sul	2060	Possível província ígnea
	Windimurra, W Austrália	2800	Cintura arcaica
Dique gigante	Tugtûtog, S Gronelândia	1163	Rift continental
Tipo dique	Muskox, Canadá	1270	Rift continental/ possível província ígnea
	Great Dyke, Zimbabué	2575	Rift continental/ possível província ígnea
Outras formas (não esclarecidas devidamente)	Eastern Layered Intrusion, Rum, Hébridais	60	Pluma associada a margem passiva
	Stillwater, Montana	2700	Possível zona subdução

Embora na engenharia geológica no geral, e em particular nas classificações de maciços rochosos, não sejam particularmente relevantes as distinções litológicas/mineralógicas detalhadas (IAEG, 1981), todas as evidentes variações litológicas e texturais associadas aos gabros, e o facto de serem rochas básicas ricas em minerais ferromagnesianos, vão ser preponderantes na sua meteorização e na formação dos respetivos solos residuais e, portanto, condicionar o seu ulterior comportamento geotécnico. Assim, a composição mineralógica da rocha-mãe torna-se relevante na medida em que determinado tipo de minerais, essenciais e acessórios, condicionam a origem de um determinado tipo de solo.

Importa antes de mais distinguir alteração de meteorização; no caso da primeira, esta abrange todas as mudanças físicas ou químicas que a rocha sofreu desde a sua formação (Hunt, 2007), enquanto que a meteorização consiste nas alterações físicas e químicas induzidas pelos agentes atmosféricos, nos maciços rochosos. Assim, a primeira pode ser o resultado de, por exemplo, processos de alteração hidrotermal que ocorrem abaixo da superfície envolvendo fluidos a temperaturas elevadas, enquanto a segunda pode derivar, por exemplo, de processos de gelivação - crioclastia.

Particularmente relevante é a distinção entre os processos químicos e os físicos ou mecânicos. Os processos físicos não alteram a composição das rochas, mas promovem a sua desagregação. Aproveitando zonas frágeis das rochas e maciços como a fracturação, as raízes das árvores, o gelo ou as grandes amplitudes térmicas - termoclastia, aumentam essas discontinuidades e expõem uma maior superfície de rocha, facilitando o ataque químico pelas agentes atmosféricos. Por seu lado a meteorização química modifica as propriedades das rochas, transformando os minerais e criando texturas novas. Os processos de oxidação, carbonatação e hidrólise, criam novos minerais e, em conjunto com a própria alteração hidrotermal, são os principais responsáveis pela formação dos solos residuais (Hunt, *op. cit.*).

Embora se possam referir vários fatores facilitadores da meteorização das rochas como a topografia, o tempo de atuação dos processos, o modo de instalação do magma e a sua maior ou menor exposição aos agentes, a composição da rocha mãe e o clima são os fatores que se salientam pela sua dominante importância. Excluem-se aqui os fatores antrópicos por não se revelarem, a este nível, dominantes no âmbito da presente investigação.

O clima é particularmente determinante na espessura dos horizontes de solo residual. A presença de água no estado líquido e de temperaturas elevadas favorece a meteorização química, o que explica as espessuras elevadas de solos residuais nas regiões tropicais e a sua quase ausência nas regiões desérticas e polares (figura 1.4).

Uma vez que a composição da rocha-mãe e o tipo de minerais que a constituem vão condicionar a respetiva suscetibilidade à alteração/meteorização, as rochas máficas, com predominância de minerais ferromagnesianos, como é o caso do gabro, são menos resistentes à meteorização (Hunt, *op. cit.*). A série de Goldich, representada na figura 1.5, classifica em termos da maior ou menor resistência à alteração/meteorização os principais minerais, evidenciando que rochas mais ricas em anfíbois, piroxenas, olivinas e plagioclases sódico-cálcicas, como é o caso dos gabros, são menos estáveis, logo de meteorização mais fácil.

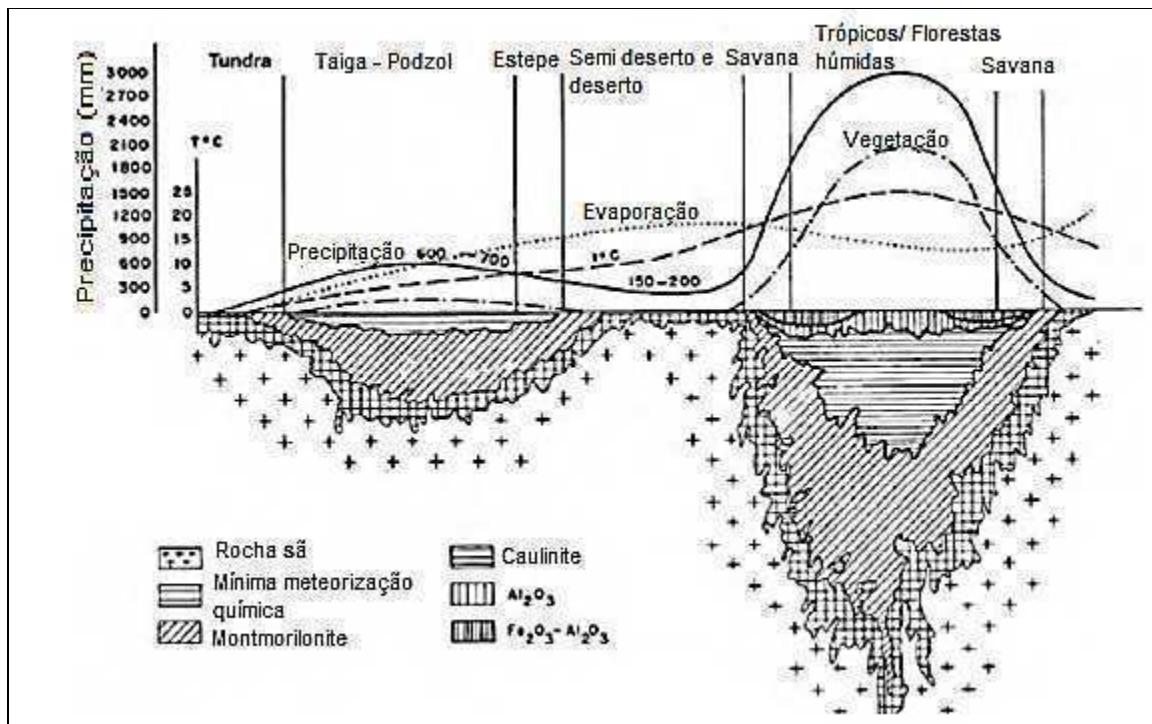


Figura 1.4 – Relação entre a penetração da meteorização química e o tipo de clima, modificado de (Anon, 1990)

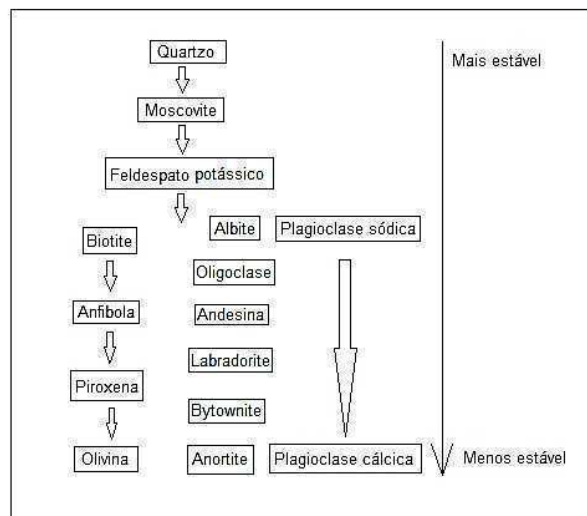


Figura 1.5 – A série de estabilidade dos minerais de Goldich, modificado de (Goldich, 1938)

Hunt (*ib.*) refere como produtos de meteorização da olivina, a serpentina e a montmorilonite, e das piroxenas, a clorite e a montmorilonite; estes dois últimos minerais ainda se podem transformar em caulinite e óxidos de ferro.

Estes produtos de meteorização das rochas básicas, isto é pobres em sílica, vão estar presentes nos solos que compõem o perfil de meteorização, vulgarmente referidos por alteração, das rochas. Hunt

(ib.) indica que a formação de solos argilosos é fortemente condicionada pelas características de pluviosidade e drenagem. Por exemplo, condições de fraca pluviosidade e drenagem deficiente favorecem a retenção de magnésio, originando a formação de montmorilonite. Velde & Meunier (Velde & Meunier, 2008) referem que, no caso dos gabros, a fração argila pode variar desde a rocha meteorizada até ao saprólito entre 0% a 15%, enquanto que para o caso de granitos essa variação é de 5% no máximo. Estas diferenças traduzem a instabilidade dos minerais ferromagnesianos, mais abundantes no gabro do que no granito (Figura 1.5).

Assim, é a composição da rocha-mãe que condiciona a granulometria, a plasticidade e o tipo de argilas presentes no respetivo solo residual, determinando grande parte do comportamento geomecânico destes solos (Vaz, 1996). A figura 1.6 exibe um perfil tipo que ilustra o resultado da meteorização em rochas ígneas básicas, em clima húmido e temperatura moderada, com referência à presença de argilas nos respetivos solos residuais.

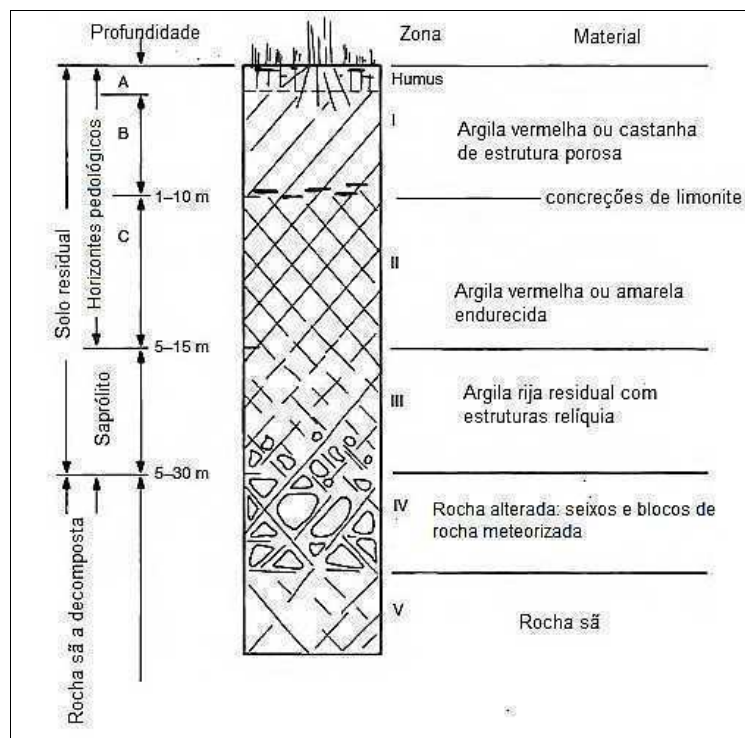


Figura 1.6 – Perfil de meteorização de rochas basálticas, Brasil Central, em clima húmido e temperatura moderada (Vargas, 1974)

Para as rochas básicas em geral, (Hunt, 2007) considera quatro zonas distintas no respetivo perfil de meteorização, a saber:

- a. Uma zona superior, de solo residual, predominantemente constituída por argilas e alguma matéria orgânica;
- b. Uma zona intermédia, também constituída maioritariamente por argilas, mas menos desenvolvida que a suprajacente;
- c. Uma zona de saprólito, na qual se identificam ainda relíquias do maciço rochoso e em que os materiais estão apenas parcialmente decompostos, passando gradualmente à zona de meteorização do maciço rochoso;
- d. Zona de meteorização do maciço, onde se inicia o substrato.

Vários outros autores apresentam descrições distintas de perfis de meteorização tipo (tabela 1.2). Os perfis representados na tabela 1.2 aplicam-se a rochas ígneas, e em alguns casos a sedimentares e metamórficas, salientam-se no entanto os propostos por (Vargas, 1974) e (Pastore, 1995), que referem concretamente as rochas basálticas. Os basaltos são mineralogicamente próximos dos gabros, embora a sua textura seja distinta, apresentando estes últimos uma textura fanerítica, fator que aumenta a superfície de mineral exposta à meteorização. Salienta-se o facto do zonamento apresentado para os perfis de meteorização das rochas ígneas (tabela 1.2), semelhante para os diversos autores, coincidir fortemente com o zonamento geotécnico desses mesmos perfis. Na realidade, cada horizonte de meteorização exhibe as suas próprias propriedades geotécnicas (Wesley, 2010), apresentando claras variações nos seus índices físicos. Quanto mais próximo do topo do perfil, maior será a porosidade, o índice de vazios, o teor em água e menor o peso volúmico, regra geral diminuindo o tamanho médio das partículas (Fernandes, 2006), ficando muitas vezes essas partículas mais finas suscetíveis de sofrerem arraste por percolação descendente da água e, conseqüentemente, a concentrarem-se no horizonte imediatamente infrajacente, enriquecendo-o em partículas argilosas. O horizonte superior tem tendência a ser mais suscetível à erosão pois perdeu coesão o que provoca, conseqüentemente, maior suscetibilidade à instabilização nesses horizontes.

A figura 1.7 ilustra as diferenças entre as classificações pedológica do perfil do solo e a geotécnica, demonstrando as preocupações geotécnicas com o tipo e dimensão dos materiais, bem como com a sua estrutura. A classificação pedológica é mais detalhada nos horizontes superiores, designados de A e B, dada a presença de matéria orgânica e argilas, e de atividade biológica. Ao contrário, as distinções da caracterização geotécnica para cada horizonte são, no seu conjunto, mais uniformes,

abordando a mineralogia, cor, estrutura, textura e maturidade do horizonte, fatores que condicionam o comportamento geotécnico dos terrenos.

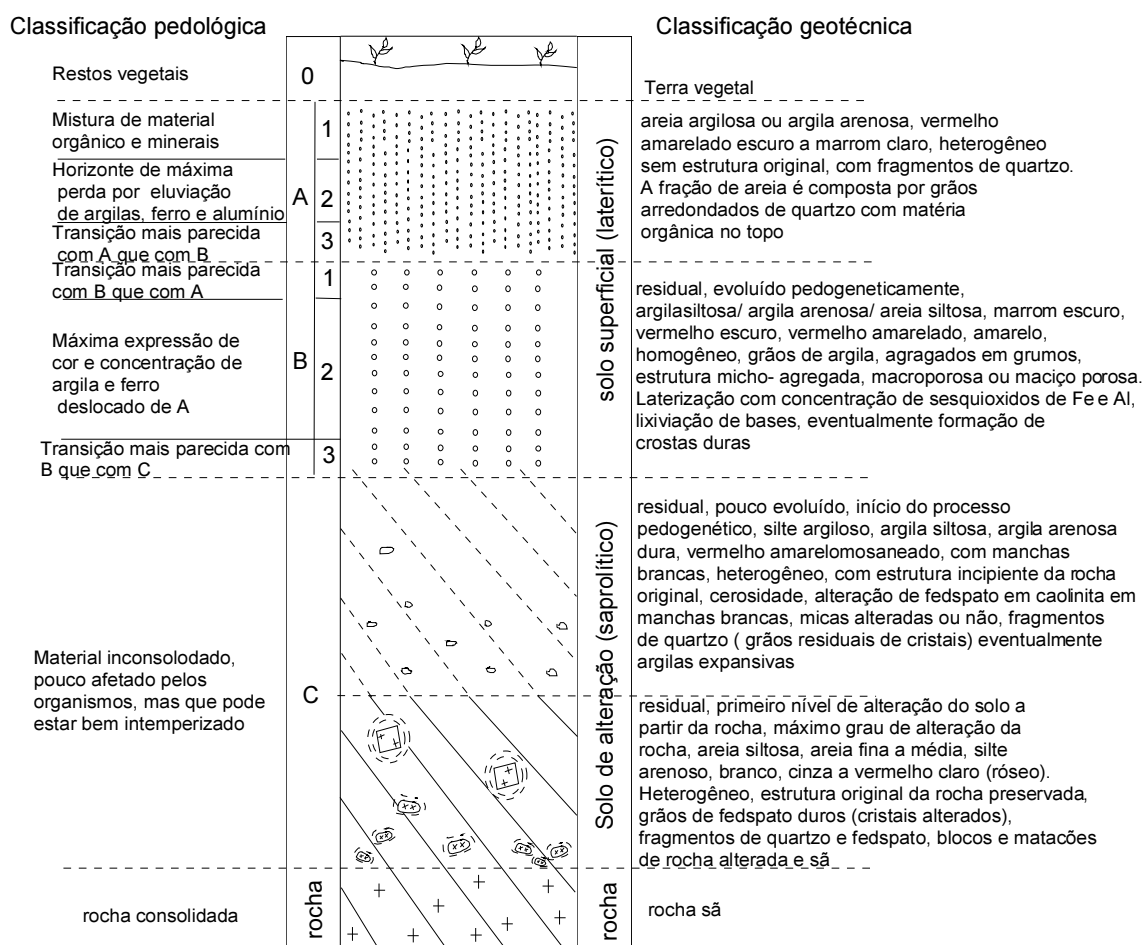



Figura 1.7 - Perfil de um solo residual: uma comparação entre as classificações pedológica e geotécnica, modificado de (Janeiro, 2000)

O perfil geotécnico ilustrado na figura 1.7 é típico de regiões com climas tropicais apresentando, por isso, diferenças para os perfis de regiões temperadas a mediterrânicas, como a portuguesa. A presença de um horizonte laterítico só é possível em situações de pluviosidade elevada associada a temperaturas elevadas de climas tropicais. Este tipo de clima favorece também a formação de um saprólito espesso, contrariamente ao que acontece na latitude de Portugal, em que este horizonte é comparativamente pouco possante.

Tabela 1.2 – Comparação entre algumas descrições de perfil de meteorização de solos residuais de rochas ígneas, modificado de (Vallejo & Ferrer, 2011)

Perfil de meteorização tipo para maciços rochosos	Little (1969) Rochas ígneas	Vargas (1974) Rochas ígneas basálticas e arenitos	Deere & Patton (1971) Rochas ígneas e metamórficas		Sowers (1967 <i>in</i> Silveira, 2002) Rochas ígneas e metamórficas	BGS (1970) Rochas ígneas	Pastore (1995) Rochas basálticas	ISRM (1981) Rochas ígneas
	Solo Grau VI	Horizonte I Solo residual maduro	II - Solo residual	Horizonte IA	Horizonte A	Solo residual Grau VI	Solo orgânico (I)	Solo residual VI
				Horizonte IB	Horizonte B		Solo laterítico (II)	
	Rocha completamente meteorizada Grau V	Horizonte II Solos com vestígios de estruturas reliquias		Horizonte IC (saprólito)	Saprólito	Rocha completamente meteorizada Grau V	Solo saprólítico (III)	Completamente meteorizada V
	Rocha muito meteorizada Grau IV	Horizonte III Solos com estruturas de 'matações' (saprólito)	I - Zona de transição (rocha alterada)	Horizonte IIA Horizonte de transição com rocha meteorizada (saprólito)	Zona de transição (parcialmente meteorizada)	Rocha muito meteorizada Grau IV	Saprólito (blocos de rocha e solo) (IV)	Muito meteorizada IV
	Rocha moderadamente meteorizada Grau III	Horizonte IV Rocha meteorizada com zonas decompostas		Horizonte IIB Rocha parcialmente meteorizada		Rocha moderadamente meteorizada Grau III	Rocha Alterada (V,VI)	Moderadamente meteorizada III
	Rocha pouco meteorizada Grau II					Rocha ligeiramente meteorizada Grau II		
	Rocha sã Grau I	Horizonte V Rocha sã		Horizonte III Rocha sã	Rocha sã	Rocha quase sã Grau IB	Rocha sã (VII)	Rocha sã I
						Grau IA Rocha sã		

1.5 Caracterização geotécnica de maciços gabróicos

A caracterização geotécnica dos terrenos é um tema relativamente recente, datando do século passado, e surge da sistematização da necessidade de conhecer, avaliar e caracterizar os terrenos e do papel que desempenha a sua aplicação, quer na construção com economia, segurança e qualidade, quer no planeamento sustentável.

Neste contexto, recorre-se a um conjunto de técnicas e procedimentos no sentido de avaliar parâmetros e atributos próprios desses terrenos, tentando antever o seu comportamento na sequência de intervenções diversas de engenharia e/ou prever eventuais necessidades construtivas, minimizando e controlando os inerentes perigos/riscos geotécnicos associados. A caracterização geotécnica será tão mais detalhada quão mais importante for o projeto ou a especificidade do maciço em referência.

O estudo dos maciços, cada vez mais direcionados a pensar na ulterior modelação do seu comportamento, necessita da definição correta e o mais aproximada da realidade possível, das suas propriedades, como confirma o Eurocódigo do Projeto Geotécnico (NP EN, 2010). Principalmente no caso dos maciços rochosos e segundo (Harrison & Hudson, 2000), a preocupação é cada vez mais a de caracterizar maciços considerando a sua natureza não homogénea, anisotropia e comportamento elástico não linear - DIANE (*Discontinuous, Inhomogeneous, Anisotropic and Not Linearly Elastic*) em vez de os considerar como entidades homogéneas, contínuas, isotrópicas e linearmente elásticas - CHILE (*Continuous, Homogenous, Isotropic and Linearly Elastic*).

A quantificação da gama dos parâmetros característicos depende, essencialmente, da realização de ensaios, efetuados *in situ* e/ou em laboratório. Mas a Geotecnia está sempre na dependência da Geologia, pelo que importa conhecer os maciços do ponto de vista da sua estrutura e litologia para quantificar adequadamente as suas propriedades geotécnicas e eventuais variações. Para o efeito, deve-se primeiramente efetuar a individualização de cada uma das zonas com comportamento geral globalmente 'homogéneo' que constituem o maciço, determinar em seguida as respetivas características da rocha como material intacto e as do maciço no seu conjunto, em particular das descontinuidades que o compartimentam em blocos de rocha, assim como os aspetos de caracterização dos solos que os recobrem, muitos deles de natureza residual.

Concretizando, as rochas ígneas devem ser primeiramente analisadas quanto à sua origem e ocorrência, identificação petrográfica (cor, textura e mineralogia), classificação e estado de meteorização. Do ponto de vista da engenharia geológica e segundo (Vallejo & Ferrer, 2011), esta caracterização engloba ainda algumas propriedades físicas da rocha intacta, tais como a porosidade

efetiva (P_e), peso volúmico (γ), peso volúmico seco (γ_d), teor em água (w) e estado de meteorização (W). A porosidade da rocha, por poros, é geralmente desprezável, face à porosidade do maciço rochoso, dada pelas descontinuidades. Como propriedades mecânicas a analisar da rocha intacta, os mesmos autores indicam a resistência à compressão uniaxial (σ_c), o índice de carga pontual (I_s), a dureza ao resalto (R), a resistência à tração (σ_t), o coeficiente de Poisson (ν), o módulo de Young (E) e parâmetros de resistência ao corte, como o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c), a que somam as velocidades de propagação das ondas sísmicas longitudinais e de corte (respetivamente, V_p e V_s).

Para os maciços rochosos importa adicionar às características referidas para a rocha intacta, as das descontinuidades e a importância da presença de água. Para a definição das descontinuidades (falhas, foliação, dobras, fraturas, xistosidade, filões, entre outros) podem considerar-se, por exemplo, as características listadas nos sistemas de classificação de maciços rochosos Q e RMR, amplamente utilizados, tais como a orientação, espaçamento, abertura, preenchimento, rugosidade e continuidade.

Às rochas e aos maciços rochosos estão associados, num completo perfil de meteorização, os solos, designados de residuais, mais ou menos maduros. No que se refere a estes, (Nunes & Saião, 2011) definem que devem analisar-se, no campo, os materiais de transição resultantes dos processos de meteorização e ter em consideração a geomorfologia e a estrutura geológica. No laboratório devem avaliar-se as propriedades mineralógicas através de determinações petrográficas macro e microscópicas da rocha-mãe, as propriedades físicas dos materiais recolhidos e, utilizando métodos de difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX) determinar, respetivamente, a sua composição mineralógica e química.

Viana da Fonseca (Viana da Fonseca, 1996) salienta o facto de que a identificação e caracterização de solos residuais requer critérios mais exigentes do que os utilizados nas classificações clássicas da mecânica dos solos, por exemplo por aplicação da Classificação Unificada de solos - USCS (ASTM D 2487, 2006) ou da Classificação para Fins Rodoviários (AASHTO, 2004), que recorrem às granulometrias dos solos e aos respetivos limites de consistência, limite de liquidez (w_L) e limite de plasticidade (w_p), bem como ao índice de plasticidade (IP). Assim, Viana da Fonseca (*ib.*) defende uma classificação mais envolvente, que deverá incluir a descrição do perfil de meteorização e aspetos químicos, físicos e mineralógicos dos materiais presentes, salientando ainda o conhecimento do estado higrométrico (teor de água natural - w e grau de saturação - S), da cor, da resistência-consistência, da fábrica (*fabric*), da textura, do peso volúmico (γ), do comportamento mecânico-hidráulico aparente (plasticidade, deformabilidade, resistência, permeabilidade, entre outras) e da mineralogia. Exemplos de parâmetros de comportamento são os obtidos a partir do ensaio de

compactação Proctor, onde se determina o peso volúmico seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e o teor em água ótimo (w_{opt}) para uma compactação que permita aumentar a resistência e diminuir a deformabilidade e permeabilidade de um dado solo.

Apresentam-se, em seguida, os principais métodos e técnicas de estudo utilizados no âmbito da caracterização geotécnica aplicada genericamente a maciços gábróicos.

1.5.1 Métodos de estudo

A caracterização geotécnica de terrenos visa determinar a sua natureza e os respetivos atributos físicos, mecânicos e, às vezes, hidráulicos, identificando eventuais aspetos particulares das formações que os constituem. Pretende-se, deste modo, obter as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos maciços e a gama de variação dos respetivos parâmetros, fundamentais para o dimensionamento em engenharia.

A caracterização de terrenos segue, regra geral e no contexto das diversas fases de estudo de uma dada obra geotécnica, a sequência metodológica seguinte: recolha bibliográfica, estudo fotogeológico, reconhecimento de campo, prospeção e amostragem, ensaios *in situ* e de laboratório. Na figura 1.8 representa-se genericamente esta metodologia exemplificando, para cada uma das fases, os potenciais procedimentos e alternativas disponíveis. A compilação da bibliografia existente permite adquirir informações que condicionarão as etapas seguintes do trabalho, no sentido de obter a confirmação de alguns parâmetros e a necessidade de adquirir dados novos.

O trabalho de campo permite conhecer as condições *in situ*, como as relacionadas com a hidrogeologia ou geomorfologia e clima, elaborar os perfis dos maciços, com o levantamento das características das descontinuidades e a realização de ensaios no local recorrendo, por exemplo, ao martelo de Schmidt ou à determinação expedita do ângulo de atrito das descontinuidades. Os trabalhos de campo contribuem ainda para refinar os locais de amostragem.

O complemento da caracterização dos maciços faz-se também recorrendo à prospeção geofísica e/ou mecânica. A primeira, dadas as suas particularidades, permite abranger a baixo custo e rapidamente áreas maiores, determinando a espessura da camada de meteorização, o estado de fracturação/meteorização do maciço e a profundidade da rocha-mãe, através do estudo, regra geral, da propagação de ondas sísmicas ou da resistividade elétrica dos terrenos. A prospeção mecânica permite o acesso direto aos maciços através de valas, trincheiras, poços ou sondagens, viabilizando a amostragem de materiais não perturbados e a realização de ensaios *in situ* para determinação de algumas propriedades mecânicas e hidráulicas. A utilização de métodos geofísicos conjugados com

os mecânicos, como é o caso da realização de prospeção geofísica ao longo de furos de sondagens, permite detalhar o conhecimento das condições de fracturação, da resistência e/ou do estado de meteorização ao longo de certos trechos de sondagens, tendo sido utilizada com sucesso no estudo de maciços gabróicos em locais de difícil acessibilidade como, por exemplo, junto de dorsais oceânicas (Bartezko *et al.*, 2005). O mesmo tipo de associação acontece na realização do ensaio do cone sísmico, SCPT – *Seismic Cone Penetration Test*, que combina a técnica da sísmica direta ao longo de um furo (*downhole*) com a realização do ensaio CPT em solos.

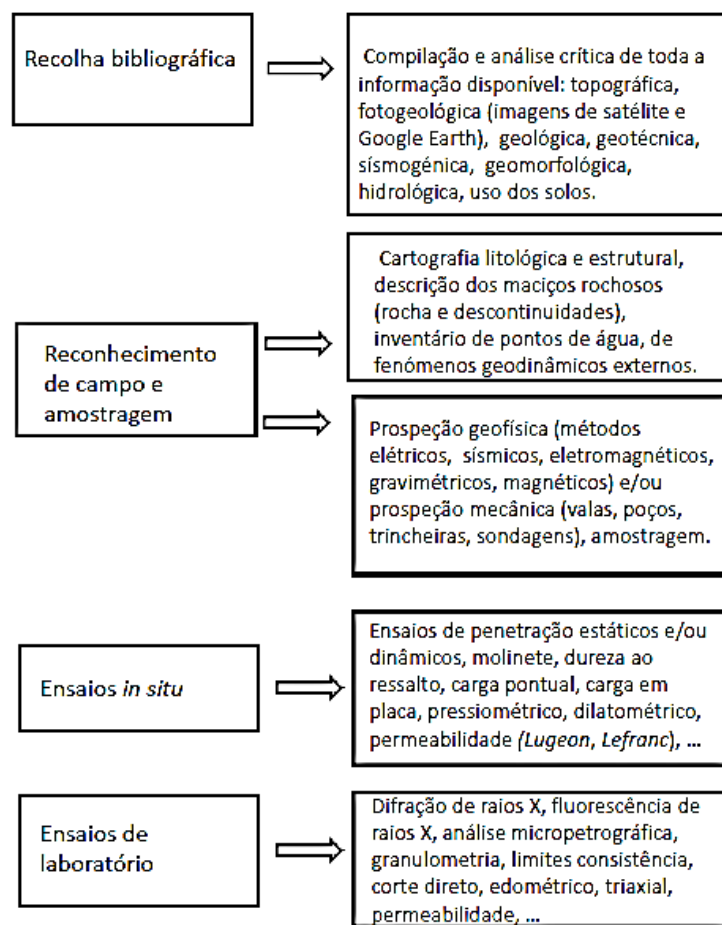


Figura 1.8 - Esquema genérico da metodologia adotada na caracterização geotécnica de terrenos

Os ensaios laboratoriais, que se regem por procedimentos normalizados, permitem obter as propriedades das rochas/solos que contribuem para quantificar o conhecimento dos maciços rochosos e dos respetivos perfis de meteorização e, portanto, contribuir para a modelação do comportamento geotécnico.

Como referido na caracterização dos perfis de solos, recorre-se frequentemente a técnicas laboratoriais de caracterização química e mineralógica, nomeadamente difração e fluorescência de

raios X, que servem de indicador para a quantificação da meteorização e da maturidade dos solos resultantes. Em maciços ígneos, é frequente o uso de índices químicos na análise de perfis de meteorização (Duarte, 2002), (Ng *et al.*, 2001) e (Fiantis *et al.*, 2010). A variação destes índices em profundidade reflete a maior ou menor intensidade de meteorização e, consequentemente, de maturidade dos produtos resultantes, sempre na dependência de fatores externos, nomeadamente do clima. Na tabela 1.3 resumem-se os índices químicos de meteorização mais comuns para rochas ígneas, maioritariamente ácidas, com todos os rácios a referirem-se a proporções moleculares. Na bibliografia consultada não é clara a distinção entre a aplicação destes índices e a mineralogia da rocha, uma vez que se verificou a sua aplicação para granodioritos (Ceryan, 2009), granitos (Ng, *et al.*, 2000), cinzas vulcânicas (Fiantis *et al.*, 2010), rochas metamórficas félsicas (Price & Velbel, 2003) e solos vulcânicos básicos europeus, incluindo os do arquipélago dos Açores (Taboada, *et al.*, 2007) . Os índices traduzem a mobilidade de alguns elementos químicos, o seu enriquecimento ou empobrecimento com o aumento da meteorização, mas não parecem evidenciar especificamente a suscetibilidade dos minerais máficos à meteorização. A relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ é um bom indicador para o grau de meteorização dos feldspatos, mas não consegue por si só distinguir se estes constituem uma rocha granítica ou gabróica. A mais-valia deste tipo de análise parece estar na possibilidade de reconhecer o grau de maturidade dos solos resultantes da meteorização. Regra geral, o aumento da meteorização das rochas ígneas provoca um empobrecimento em alguns óxidos, nomeadamente os de ferro, alumínio e magnésio (Indra, 2006) .

Tabela 1.3 - Resumo dos índices de meteorização utilizados mais frequentemente em rochas ígneas, modificado de (Price & Velbel, 2003).

Índice	Fórmula	Valor ótimo	Valor ótimo	Autores
		rocha sã, W_1	rocha decomposta, W_5	
R	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	>10	0	(Ruxton, 1968)
SFOR	$\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	(Gerard, 1992)
WIP	$100*((2\text{Na}_2\text{O}/0,35)+(\text{MgO}/0,9)+(2\text{K}_2\text{O}/0,25)+(\text{CaO}/0,7))$	>100	0	(Parker, 1970)
V	$(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O})/(\text{MgO}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$	<1	∞	(Vogt, 1927)
CIA	$100*(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$	≤ 50	100	(Nesbitt & Young, 1984)
CIW	$100*(\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}))$	≤ 50	100	(Harnois, 1988)
PIA	$100*((\text{Al}_2\text{O}_3-\text{K}_2\text{O})/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}))$	≤ 50	100	(Fedo <i>et al.</i> , 1995)
STI	$100*((\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)/((\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)+(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)+(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2)))$	>90	0	(da Jayawardena & Izawa, 1994)
PWI	$100*(\text{SiO}_2/(\text{TiO}_2+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3))$	>50	0	(Souri <i>et al.</i> , 2006)

R – Ruxton ratio; WIP – Weathering index Parker; SFOR – Silica Ferric Oxide Ratio; PWI – Product of weathering index; V – Vogt residual index; CIA – Chemical index of alteration; CIW – Chemical index of weathering; PIA – Plagioclase index of alteration; STI – Silica titanium index

Muitos outros índices podem ser calculados para caracterizar a meteorização (Gerard, 1992), importando no entanto perceber a sua aplicabilidade às condições e especificidades do maciço em estudo. No capítulo de apresentação de resultados serão tecidas algumas considerações relativamente à aplicabilidade destes índices aos gabros em estudo dado que, face ao quimismo destas rochas, considera-se que alguns dos índices apresentados, como o R, o CIW ou o PIA poderão não se revelar adequados.

Está atualmente disponível uma vasta gama de informação sobre os métodos de caracterização de maciços em formato, quer analógico, quer digital em acesso livre na Internet. De entre alguns dos que se consideram mais abrangentes e completos, e especificamente para o âmbito do presente trabalho, referem-se o capítulo 4 de (Janeiro, 2000), o manual de (Mayne et al, 2001), a circular de (Sabatini *et al.*, 2002), e ainda os trabalhos de (Ng *et al.*, 2000) e (Vallejo & Ferrer, 2011).

Como é óbvio, as metodologias adotadas devem adequar-se às condicionantes da área e à finalidade do estudo em referência, sendo por isso ajustáveis. Deve considerar-se ainda o tipo de terreno, particularmente no caso da prospeção mecânica e dos ensaios de campo e laboratoriais. A definição do tipo de ensaios a realizar depende do tipo de terreno a caracterizar. Por exemplo, a realização de ensaios para determinar a resistência à penetração dinâmica em sondagens através do ensaio SPT - *Standard Penetration Test*, é indicada para maciços terrosos, em particular os arenosos, ou apenas nas zonas mais meteorizada dos maciços rochosos.

A metodologia adotada na presente investigação para caraterizar os maciços de gabros da área em referência, baseou-se na informação compilada e descrita nesta secção tendo sido adaptada às situações concretas de trabalho e respetivas condicionantes, nomeadamente económicas e temporais. Essa metodologia será detalhada adiante, no Capítulo 3.

1.5.2 Amostragem e representatividade

Particularmente importante na caracterização geotécnica e independentemente da respetiva finalidade, é a qualidade e representatividade da amostragem, que definem e condicionam de sobremaneira a informação obtida. Os locais de amostragem devem ser adequadamente georreferenciados e garantir que as amostras recolhidas representam, efetivamente, as unidades a caracterizar, devendo o seu acondicionamento e transporte para laboratório continuar a garantir essa qualidade.

A maior parte da literatura temática debruça-se, em particular, sobre a representatividade da amostragem na caraterização geotécnica. A importância da amostragem é bastante evidente quando o que se pretende definir são os valores característicos das unidades geotécnicas em análise; acresce

ainda que o número de amostras a recolher é condicionado não apenas pela dimensão da área em estudo, mas também pelo tipo de ensaios a que serão submetidas.

Zuquette (Zuquette & Gandolfi, 2004) no âmbito da realização de cartografia geotécnica definem que a amostragem pode ser dividida em dois grupos: a aleatória, ou probabilística, e a não aleatória, ou não probabilística. Justifica-se a aplicação desta classificação na amostragem para caracterização geotécnica dado que os parâmetros a caracterizar são da mesma grandeza. A amostragem aleatória é aquela em que cada parcela do território em referência tem a mesma hipótese de ser escolhida do que qualquer outra; trata-se de um procedimento que não é o mais adequado, nem o mais exequível de implementar no âmbito de metodologias científicas de caracterização de maciços porque não tem em conta a distribuição espacial das formações nem considera os aspetos particulares, como a presença de uma caixa de falha preenchida por argila, por exemplo.

No caso da amostragem não aleatória, ou seja, determinística, as amostras são obtidas de forma dirigida, sendo por assim dizer selecionadas de forma a representarem adequadamente a região em estudo. No âmbito desta amostragem, os autores (*op. cit.*) definem ainda cinco subtipos: a amostragem por cota, de conveniência, accidental, racional e específica. A amostragem por cota representa um número pré-definido de unidades a investigar, e portanto, a amostrar. A amostragem de conveniência está relacionada com uma situação concreta a ser amostrada, por exemplo uma formação ou um tipo específico de material. A amostragem accidental é realizada tendo em conta aspetos práticos de disponibilidade das amostras, por exemplo haver uma escavação ou um talude disponíveis para amostrar. A amostragem racional é feita por escolha deliberada, selecionando os locais, por exemplo afloramentos, que melhor representam os parâmetros a estudar. A amostragem específica é definida quando poucos ou apenas um único elemento de uma população é estudado, não sendo objetivo da investigação a generalização de resultados.

Aqueles autores (*ib.*) consideram ainda que a amostragem racional é a que melhores resultados apresenta no âmbito da execução de cartas geotécnicas, pois a seleção é realizada de acordo com a experiência do utilizador, permitindo a seleção de locais e amostras que se traduzem como representativas do objeto de estudo - determinada unidade geotécnica, determinado perfil de meteorização, entre outros. Este processo permitirá assim a recolha de amostras, em quantidade e na qualidade ideal, para realizar todos os ensaios necessários.

A amostragem não aleatória, embora seja uma metodologia mais rápida e que recorre a um menor número de amostras do que a maioria dos outros métodos, tem a desvantagem de não ter sustentação estatística, do que resulta que a extrapolação de resultados, para a população total, deverá ser efetuada com cautela (*ib.*). No caso concreto da presente investigação, esta falta de

sustentação estatística não parece tornar-se relevante, uma vez que não se está a elaborar uma carta geotécnica, mas apenas contribuir para a obtenção de valores característicos para os principais parâmetros das unidades geotécnicas que for possível distinguir no maciço gábrico do CIB, numa dada região a poente de Beja. Como é indicado no EC7 (NP EN, 2010), a escolha dos valores característicos dos parâmetros geotécnicos deve utilizar resultados obtidos em ensaios laboratoriais e de campo, complementados por experiência bem estabelecida, o que reforça a utilidade de uma amostragem mais determinística. Assume-se assim a escolha da amostragem racional, pese embora que dada a raridade de afloramentos disponíveis e a falta de meios de amostragem, como o recurso a sondagens, diversas vezes foi necessário efetuar amostragem accidental.

Zuquette e Gandolfi (*op. cit.*) indicam também que o processo de amostragem para avaliar a variabilidade de uma região pode seguir três tipos de abordagens: amostragem de observação em campo, amostragem de materiais geológicos e amostragem para confirmação.

A amostragem de observação de campo é bastante representativa, resultando de análises diretas de afloramentos ou escavações, onde se visualizam os aspetos reais do maciço e das diversas relações entre as suas unidades; engloba, ainda, ensaios executados no campo. A sua maior valia é permitir a observação das condições e aspetos naturais que não podem ser analisados ou medidos em laboratório. Na caracterização de um perfil de meteorização, este método revela-se fundamental. A amostragem de materiais geológicos considera a recolha de amostras a submeter ulteriormente a ensaios laboratoriais e obedece às normas e recomendações dos métodos desses ensaios, nomeadamente na forma de colheita e no número de amostras. A amostragem para confirmação é realizada para confirmar dados obtidos de forma indireta ou obtidos em documentos já existentes, por exemplo em artigos ou relatórios técnicos consultados.

No caso concreto da amostragem de materiais geológicos, importa referir que esta tem a sua própria problemática, inerente à sua execução. Se a amostragem é realizada sem recurso a sondagens, as dificuldades são ainda mais evidentes. Estas iniciam-se no terreno, na própria recolha, podendo não existir afloramentos disponíveis ou os materiais não se encontrarem em condições de ser amostrados (Fernandes, 2006), e prolongam-se até ao laboratório, onde muitas das vezes surgem dificuldades de extração da amostra e/ou obtenção do provete, em condições não perturbadas, para os ensaios. A figura 1.9 ilustra a amostragem em blocos para obtenção de amostras não perturbadas.

Na amostragem para caracterização geotécnica de um perfil de meteorização, acresce a importância da recolha de amostras de todos os horizontes, que se apresentam com diferentes graus de meteorização e resistência, para realização de ensaios de laboratório com distintas especificidades, quer se trate de solos, argilosos ou arenosos, ou de blocos de rocha. No caso da presente

investigação, este tipo de amostragem é dificultada dado que, por imperativos económicos e de tempo, não foi possível a realização de sondagens, através das quais se poderia obter uma amostragem contínua dos vários horizontes. A reduzida espessura dos solos e a sua intensa utilização agrícola, atividade que por si só modifica a própria estrutura dos solos e não permite a colheita de amostras não perturbadas, contribuíram também para transtornar as condições de realização da amostragem. Pelo exposto, considerou-se como mais adequada e menos perturbadora, executar amostragem por talhe de blocos para cada horizonte a amostrar.

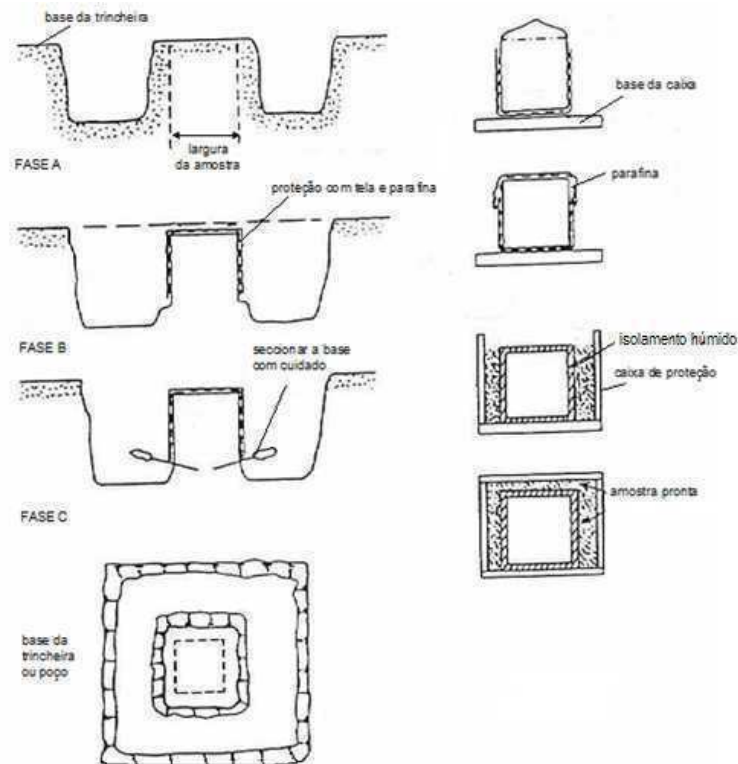


Figura 1.9 – Amostragem superficial de solo, não perturbada, por talhe de blocos (Janeiro, 2000)

A representatividade da amostragem condiciona os resultados obtidos mas não é o único fator a considerar. Os erros inerentes aos ensaios, laboratoriais e *in situ*, são outra das causas a ter em consideração, mesmo que sejam apenas devidos às próprias limitações/constrangimentos dos ensaios ou à presença de amostras anómalas (tabela 1.4). Para contornar este tipo de erros, as respetivas limitações dos ensaios devem ser consideradas e tentar realizar ensaios que se possam correlacionar, efetuando sempre uma análise crítica aos resultados obtidos.

Tabela 1.4 – Erros associados a amostragem e ensaios, modificado de (Look, 2007).

Tipo de erro	Medida / apreciação
Inerente à variabilidade do material	Realizar um número suficiente de ensaios
Amostragem	Amostragem adequada e dimensões da amostra respeitando as características do material a caracterizar
Resultados	Aceitar as limitações dos ensaios; identificar resultados discrepantes com um número suficiente de ensaios; validar resultados com ensaios correlacionados
Variabilidade estatística	Analisar criticamente as variações nos resultados; usar os resultados conhecendo o risco e a confiança que estes merecem

1.6 Informação geotécnica relativa a gabros

1.6.1. No mundo

A nível mundial, a informação geotécnica sobre gabros pode dividir-se em dois grupos: a genérica, coligida por vários autores ao longo do tempo, e a dirigida para estudos regionais específicos sobre locais naqueles tipos litológicos a afetar por obras de engenharia. A primeira encontra-se disponível particularmente em capítulos de livros sobre mecânica das rochas e suas aplicações, onde são fornecidos valores, em especial médios, de diversas características físicas e/ou mecânicas para diferentes tipos de rochas, visando a sua caracterização genérica enquanto geomaterial. Na tabela 1.5, apresenta-se uma síntese de gamas de valores para alguns dos principais parâmetros geotécnicos de gabros, disponíveis na bibliografia consultada (Smith & Collis, 2001), (Read & Stacey, 2009) e (Vallejo & Ferrer, 2011).

Tabela 1.5 – Resumo da gama de valores para alguns parâmetros geotécnicos de gabros

Fonte	γ_d (kN/m ³)	P_e (%)	w (%)	V_p (m/s)	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)
Smith <i>et al.</i> , 2001	-	-	0,2–5,7	-	180-190	-	-	-	-	-
Read <i>et al.</i> , 2009	26,5 - 30,4	-		-	210-280	5-30	30-65	0,10-0,20	-	-
Vallejo <i>et al.</i> , 2011	31	0,1- 0,2		4500-6500	210-280	14 -30	10-65	0,12 –0,20	30	35

O segundo grupo de informação é mais escasso e refere-se a artigos sobre estudos específicos, normalmente publicados em revistas da especialidade, muitas das vezes com divulgação interna no país de origem. Neste contexto referem-se, por exemplo, trabalhos da Grécia (Aggitalis *et al.*, 1996), do SW do Rift Indiano (Gopala & Hrishna, 2005) e do Sudão (Ez Eldin *et al.*, 2007a) e (Ez Eldin *et al.*, 2007b). Do conjunto, resumiram-se as propriedades mais relevantes para a presente investigação na tabela 1.6. De referir que, do enquadramento geotectónico dos exemplos referidos, apenas os

gabros do norte da Grécia encontram algumas semelhanças com os gabros em estudo, dado que se referem a intrusões em complexos ofiolíticos. Os outros dois casos consultados estão relacionados com tectónica distensiva e formação de crosta oceânica atual. Qualquer um dos maciços é bastante mais recente do que o dos gabros do CIB, encontrando-se o complexo ofiolítico grego datado do Jurássico e os gabros do Sudão do Terciário. Salienta-se no caso dos gabros do Sudão os valores elevados obtidos para o peso volúmico e para a porosidade eficaz, diretamente relacionados com o grau de meteorização.

Tabela 1.6 – Valores de alguns parâmetros mecânicos para gabros na Grécia, Índia e Sudão

Fonte	γ (kN/m ³)	P _e (%)	e (%)	W	σ_c (MPa)	R _L	I _s (MPa)	E (GPa)	ν
Aggialis <i>et al.</i> , 1996	-	-	-	W ₁₋₂	6,30 -107,50	19,50 – 57,20	0,34 – 4,54	0,96 – 9,84	-
Gopala <i>et al.</i> , 2005	29,3 ± 1,5	1,05 ± 0,49	0 – 0,004	W ₁₋₂	-	-	-	-	-
Ez Eldin <i>et al.</i> , 2007a, 2007b	30	1,96	-	W ₁₋₂	118	-	15,2	12,74	0,4
	24	6,27	-	W ₄	29,2	-	5,8	1,49	0,4

Na tabela 1.7 representam-se os valores de propagação das ondas elásticas para gabros em função do seu estado de meteorização e composição mineralógica.

Tabela 1.7 – Valores de propagação das ondas sísmicas P e S obtidos em gabros da Índia e do Sudão

Fonte	Gopala <i>et al.</i> , 2005				Ez Eldin <i>et al.</i> , 2007a	
meteorização vs mineralogia	gabro, W ₁	gabro olivínico, W ₁	gabro, W ₂	gabro olivínico, W ₂	gabro, W ₁₋₂	gabro, W ₄
V _p (m/s)	6741	6697	6542	6508	5481	2367
V _s (m/s)	-	-	-	-	3457	1544

Regra geral, os valores apresentados pelos diferentes autores concertam-se entre si, conduzindo a uma gama de valores bem balizado para este tipo litológico. Como seria de esperar da análise das tabelas 1.6 e 1.7, verifica-se uma influência significativa da intensidade de meteorização nos valores dos parâmetros geotécnicos obtidos. Tal decorre do acréscimo na intensidade de meteorização acarretar um aumento significativo da porosidade e, conseqüentemente, um decréscimo quer da resistência, quer dos valores da velocidade de propagação das ondas sísmicas.

As principais dificuldades que se podem levantar na interpretação e utilização de valores da bibliografia prendem-se com o facto de não serem referidas, muitas vezes, as normas e metodologias adotadas nos ensaios. De facto, caso sejam adotadas as normas de cada país, e uma vez que estas podem diferir entre si, é necessária a devida ponderação na comparação de valores, já que não há garantia, por exemplo e considerando o ensaio de compressão uniaxial, de se estarem a comparar valores obtidos para provetes com a mesma relação diâmetro/altura ou com as mesmas velocidades de carregamento.

1.6.2 Em Portugal

Como referido anteriormente, o maciço eruptivo de Sines é fundamentalmente constituído por rochas gabro–dioríticas, aflorando essencialmente na parte sul da intrusão, e por sienitos. A caracterização geotécnica desta área encontra-se disponível em publicações (relatório e memória) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC (LNEC, 1974) (Oliveira *et al.*, 1978a) e (Oliveira *et al.*, 1978b), resultantes de estudos específicos levados a cabo aquando da elaboração da carta geotécnica da área de Sines e da construção do porto de Sines. É com base nessa informação que se sintetizam de seguida as propriedades geotécnicas desses tipos litológicos e dos respetivos solos residuais para a região de Sines. A tabela 1.8 representa um excerto das unidades geotécnicas definidas no âmbito da Carta Geotécnica de Sines (LNEC, 1974), onde se referem apenas as relativas aos gabro–dioritos, complexo geotécnico R₅, e aos solos residuais correspondentes, o designado complexo S₃.

O Complexo R₅ é constituído por dioritos e gabros e por afloramentos, menos extensos, de sienitos. No maciço, a passagem do maciço de rocha sã a meteorizada é realizada de forma rápida e o solo residual (Complexo S₃) que recobre o maciço apresenta espessura variável, entre 6 m e cerca de 15 m. Este solo superficial corresponde a um saibro argiloso acastanhado constituído por quartzo, feldspato alterado, biotite e argila, essencialmente montmorilonítica (*op. cit.*).

Tabela 1.8 - Excerto das unidades geotécnicas definidas na Carta Geotécnica da Área de Sines relacionadas com o Maciço de Sines, modificado de (LNEC, 1974)

Formações	Unidades estratigráficas	Unidades litológicas	Complexos geotécnicos
superficiais	--	Solos residuais	S ₃
substrato	Cretácico superior	Gabros e sienitos	R ₅

Em comparação com os gabros da região de Beja, o maciço de Sines apresenta uma maior variabilidade estratigráfica e, como referido, os seus gabros são de instalação mais recente.

As características geotécnicas destes complexos geotécnicos, R₅ e S₃, encontram-se resumidas nas tabelas 1.9 e 1.10, respetivamente. Acrescenta-se ainda que foram realizados ensaios de expansão linear do gabro, para os quais se obtiveram valores nulos (LNEC, 1974).

Tabela 1.9 - Resumo da gama de valores dos parâmetros geotécnicos definidos para o Complexo R₅, modificado de (LNEC, 1974)

Gabro-diorito	γ (kN/m ³)	P _e (%)	V _p (m/s)	E (GPa)	σ_c (MPa)
rocha sã	29,0 – 30,6	0,1	6000	90,9 – 100,7	157,0 – 184,0
rocha meteorizada	24	15	1600	-	-

Tabela 1.10 - Resumo da gama de valores dos principais parâmetros geotécnicos definidos para o Complexo S₃, modificado de (LNEC, 1974)

Limites de consistência (%)		IP (%)	Proporções passadas nos peneiros ASTM nºs (%)			γ_{dmax} (kN/m ³)	W _{opt} (%)	USCS	AASHTO
w _L	w _p		10	40	200				
30	19	11	95	53	21,5	23	8,5	SC	A-2-6 (0)

Relativamente à constituição química dos gabros de Sines e de Beja, a tabela 1.11 apresenta um resumo dos óxidos de elementos maiores presentes em amostras de gabros portugueses, selecionadas aleatoriamente de diversos autores. As três primeiras amostras (Simão, 2003), (Mateus *et al.*, 2001) e (Santos, 1990) dizem respeito a gabros do Complexo Ígneo de Beja, maioritariamente da região de Odivelas, e a última do maciço ígneo de Sines (Canilho, 1989).

Tabela 1.11 – Resumo dos teores em óxidos de elementos maiores, expressas em percentagem de peso, presentes em amostras de gabros portugueses provenientes do CIB e de Sines

Fonte	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	P ₂ O ₅	MnO	K ₂ O	TiO ₂	LOI*
(Simão, 2003)	49,02	20,83	11,34	2,58	7,95	7,27	0	0,03	0,1	0,1	0,31	0,24
(Mateus <i>et al.</i> , 2001)	48,93	15,8	14,49	2,16	9,75	6,53	-	0,02	0,13	0,19	0,43	1,84
(Pacheco dos Santos, 1990)	51,47	18,74	10,85	1,92	7,77	6,71	-	-	0,08	0,08	0,12	1,54
(Canilho, 1989)	45,97	16,55	9,96	2,63	6,43	2,55	8,55	0,62	0,13	1,66	3,63	1,23

LOI - Lost on Ignition

Para a composição química dos gabros assume-se, de uma forma geral, como valores médios (Botelho da Costa, 1985): 40- 53% de SiO₂, 15- 22% de Al₂O₃, 2- 4% de (K₂O+Na₂O), 9-16% de CaO, 0,2 - 0,5% de P₂O₅ e 2 - 10% de MgO, pelo que os valores expressos na tabela 1.11 se encontram dentro do expectável para estas litologias.

1.7 Estrutura da tese

Os temas a abordar nesta Tese encontram-se distribuídos numa estrutura com seis capítulos. O primeiro aborda genericamente o tema e os motivos subjacentes ao desenvolvimento da investigação. Sintetizam-se ainda os conhecimentos relativos à caracterização geotécnica de gabros e referem-se alguns valores de parâmetros geotécnicos obtidos em todo o mundo, incluindo Portugal.

No segundo capítulo realiza-se a descrição do material em estudo do ponto de vista da geologia e do enquadramento da área em referência no que respeita à tectónica regional, à geomorfologia, à hidrogeologia e às fontes sismogénicas, com base na bibliografia, publicada e não publicada.

O capítulo seguinte descreve a metodologia seguida para a caracterização de rochas e solos, contemplando os trabalhos de campo realizados e os locais de amostragem. Finalmente, relatam-se os procedimentos de laboratório para determinação das propriedades físicas de rochas e solos e as suas limitações.

No quarto capítulo procede-se à divulgação dos resultados adquiridos, sua análise, interpretação e discussão.

No último capítulo deste trabalho tecem-se as considerações finais sobre as conclusões obtidas, e indiciam-se futuras investigações, que ampliem e complementem a empreendida.

Nos Anexos apresenta-se a lista de relatórios geotécnicos consultados (Anexo I), exemplos das fichas de campo utilizadas (Anexo II), a lista de localização das amostras (Anexo III) e a geometria dos provetes de rocha ensaiados (Anexo IV).

As imagens ou fotografias não referenciadas são da responsabilidade da autora. Como base topográfica das infografias originais da autora utilizaram-se as folhas, na escala original 1/10.000, 509_4, 510_3, 521_4 e 520_2, cedidas pelo Instituto Geográfico Português, no âmbito do Programa de Apoio ao Fornecimento de Informação Geográfica para Investigação, Ensino e Edição – FIGIEE, e 521_2, 521_3 e 521_4 pela AMBAAL – Associação de Municípios do Baixo Alentejo e Alentejo Litoral.

Capítulo 2– Materiais em estudo

Como referido anteriormente, a metodologia normalmente seguida para a caracterização geotécnica de terrenos inicia-se pela consulta bibliográfica a todos os elementos topográficos, geológicos e geotécnicos disponíveis. Neste capítulo expõem-se os resultados dessa consulta. Apresenta-se a área em análise, nos seus enquadramentos mais relevantes: geográfico, geológico e tectónico, geomorfológico, hidrogeológico e sísmico. Numa segunda parte resume-se toda a informação técnica obtida sobre os materiais em estudo, contextualizando as características geotécnicas com recurso a relatórios não publicados e trabalhos de investigação desenvolvidos previamente.

2.1. Enquadramento geral

Os materiais em estudo no âmbito desta Tese localizam-se no interior da peneplanície alentejana, e pertencem a uma unidade geológica, o CIB, cujo estudo foi objeto de investigação recente na zona com que conflui, imediatamente a poente (Jesus, 2011); contudo, a área em referência não possui ainda cartografia geológica na escala 1/50.000 disponibilizada oficialmente.

Para abranger toda a zona em análise são necessárias as folhas 509 - Ferreira do Alentejo (IGE, 2000), 520 - Ervidel /Aljustrel (IGE, 1999) e 521 - Beja (IGE, 1994), da Carta Militar de Portugal, série M 888, escala 1:25.000, que serviram de base aos levantamentos de campo efetuados nesta investigação.

A figura 2.1 faz o enquadramento geográfico da área na qual se encontram os materiais a estudar, situada entre as coordenadas WGS84, A – N38° 03' 14,36'' W007° 59' 04,98''; B - N38° 02' 24,67'' W007° 59' 37,62''; C- N38° 01' 14,40'' W007° 51' 11,68''; D - N37° 59' 51,58'' W007° 50' 02,65''. Desenvolve-se numa extensão de cerca de 10 km, entre a cidade de Beja a nascente e a freguesia de Beringel a poente, acompanhando transversalmente o desenvolvimento, nesse mesmo sentido, das rochas gabroicas, resultando numa superfície total de cerca de 60 km².

A área é atravessada, longitudinalmente, pela estrada nacional 121 (N121). Nela têm decorrido recentemente importantes obras de engenharia, de que são exemplo os canais de adução do empreendimento para fins múltiplos de Alqueva e o prolongamento, para Oeste, do IP 8 que, por um lado obrigaram ao reconhecimento geotécnico dos maciços atravessados, por outro infligiram

escavações nesses mesmos maciços permitindo, ainda que temporariamente, o acesso a afloramentos de outra forma inacessíveis numa zona aplanada.

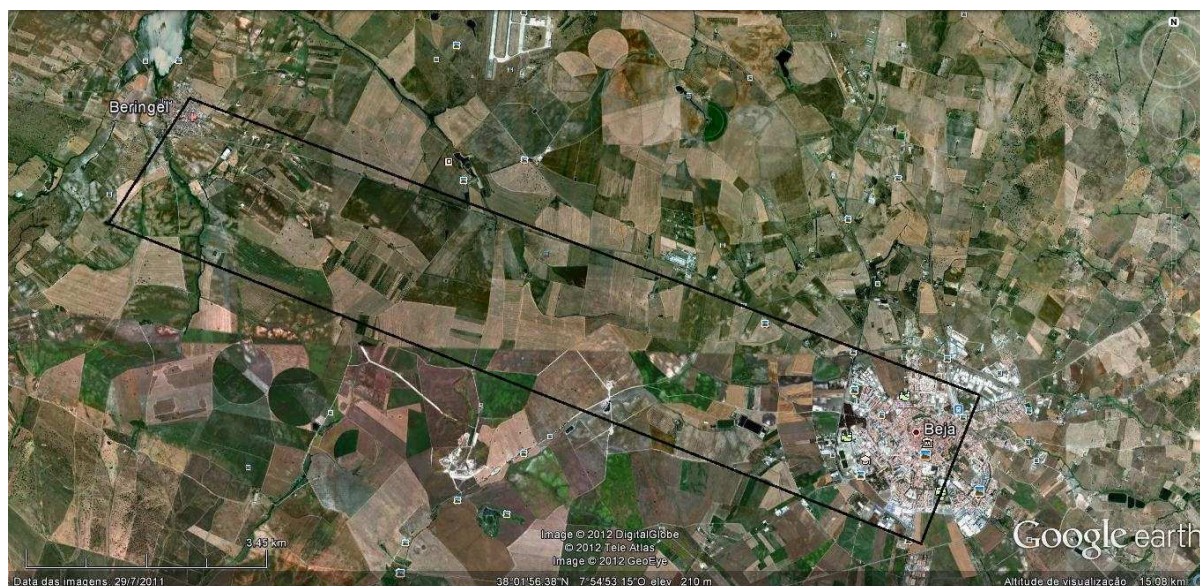


Figura 2.1– Localização geográfica da área em estudo (Google earth, 2011)

Existe na região uma grande variabilidade litológica ao nível quer das rochas gabroicas, quer dos terrenos de cobertura, que englobam os solos residuais daquelas rochas, os solos de caliços e os remanescentes da ação antrópica, designados por aterros.

Esta diversidade, que ilustra géneses e comportamentos geotécnicos distintos, carece presentemente de caracterização geotécnica, que pode ser potenciada através da rentabilização das estruturas locais disponíveis, nomeadamente do laboratório de solos da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja.

O facto de ser uma área genericamente aplanada e essencialmente agrícola, onde os solos de cobertura se encontram frequentemente remexidos, dificulta a amostragem mas não inviabiliza a importância do conhecimento dos valores característicos destes terrenos, necessários cada vez que os mesmos são afetados por obras de engenharia civil.

Os caliços, caliches ou calcretos, são acumulações de calcário branco pulverulento ou concrecionado, frequentemente associados a zonas de fraqueza do gabro e ocupando às vezes áreas muito abrangentes, podendo ser observados desde a superfície até profundidades próximas dos 3 metros. (Hunt, 2007) descreve os caliches como depósitos secundários, modificados *in situ* a partir dos depósitos primários devido a fatores climáticos, ou seja, sob condições morfoclimáticas favoráveis. (Carvalho, 2003) descreve estes ambientes característicos como subáridos, com precipitação abaixo

de 500 mm/ano; salienta ainda que estas crostas, ligadas à atividade pedológica, resultam da acumulação de carbonato de cálcio ao longo de extensões de maior ou menor importância, com espessuras que podem ser de alguns metros, no sul e sudoeste Ibérico, indicando que podem ser formadas a partir da rocha mãe por ascensão, ou lateralmente, por contaminação de águas que percolem outras rochas ricas em cálcio. (Nash & Smith, 1998) e (Alonso-Zarza & Tanner, 2010) identificam duas origens distintas para os calcretos:

- a) Os depósitos maciços, diretamente em contacto com a rocha mãe, estarão relacionados com processos ligados a percolação de águas subterrâneas;
- b) Os situados no topo de sequências cascalhentas, estarão associados a processos de pedogénese.

Observações de campo em regiões limítrofes à área em referência evidenciam a formação de calcretos associada a vários tipos litológicos, desde as sequências sedimentares da bacia do Sado até às litologias do Complexo Ofiolítico de Beja-Acebuches - COBA, factos descritos para regiões calcárias, como é o caso dos Calcários do Cano – Casa Branca (Dias *et al.*, 2006), ou para depósitos aluvionares (Pimentel *et al.*, 1996).

Considera-se que os caliços na área em investigação não constituem um solo residual específico dos gabros, mas são antes acumulações resultantes de pedogénese. Dada a sua variabilidade em espessura, em compacidade e na distribuição espacial heterogénea, devem ser considerados em estudos locais de caracterização geotécnica. No entanto, dado que não cumprem a especificidade de serem uma unidade exclusivamente relacionada com os gabros do CIB, não foram objeto de estudo intensivo na presente Tese.

Pelo exposto se justifica o facto de, para a presente investigação não ter sido empreendida qualquer amostragem nem efetuados ensaios para a caracterização geotécnica daqueles materiais.

2.2 Enquadramento geológico e geotécnico

2.2.1 Geologia e tectónica

Como referido previamente, os materiais em estudo integram ou derivam diretamente do CIB, unidade incorporada na grande unidade morfoestrutural do Maciço Ibérico designada de Zona de Ossa – Morena (ZOM).

Na figura 2.2 apresenta-se o enquadramento geológico da área em estudo. A legenda ilustrada na figura 2.3 pretende contextualizar as rochas ígneas, especificamente os gabros.

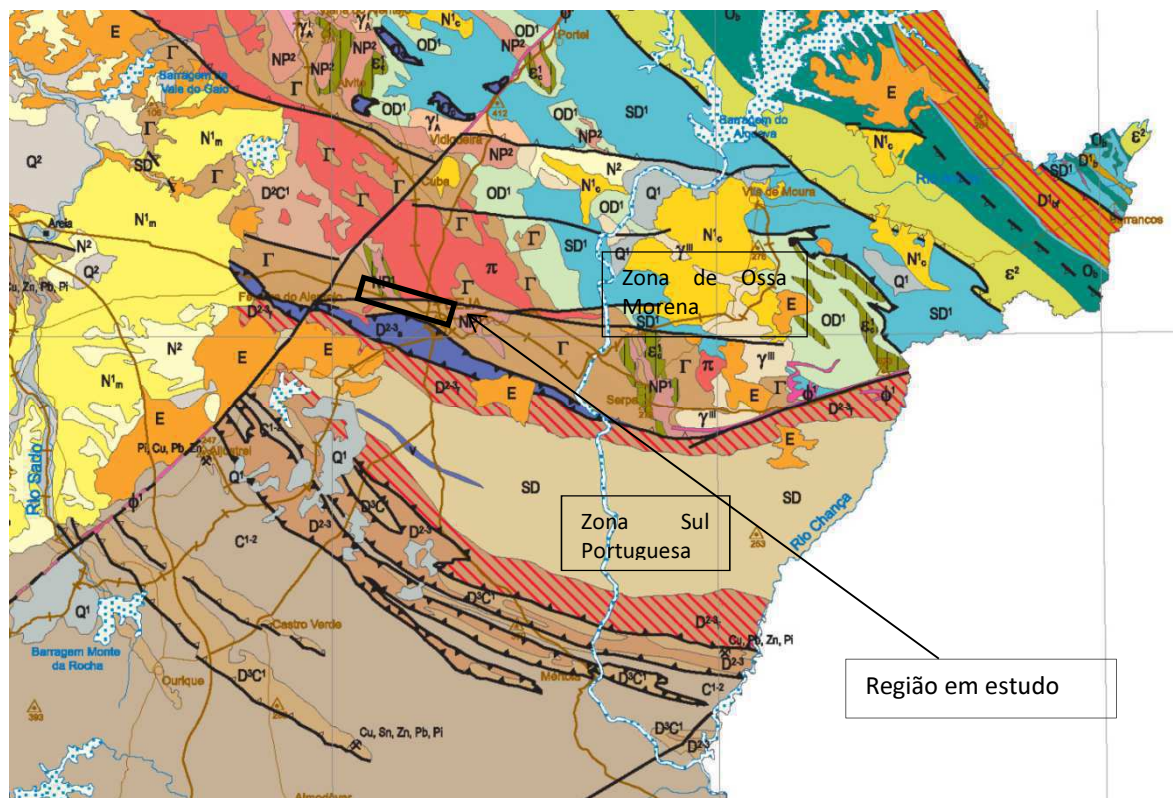


Figura 2.2– Infografia do enquadramento da área em estudo no limite da ZOM, escala original 1:1.000.000, extrato e respetiva legenda (LNEG, 2010)

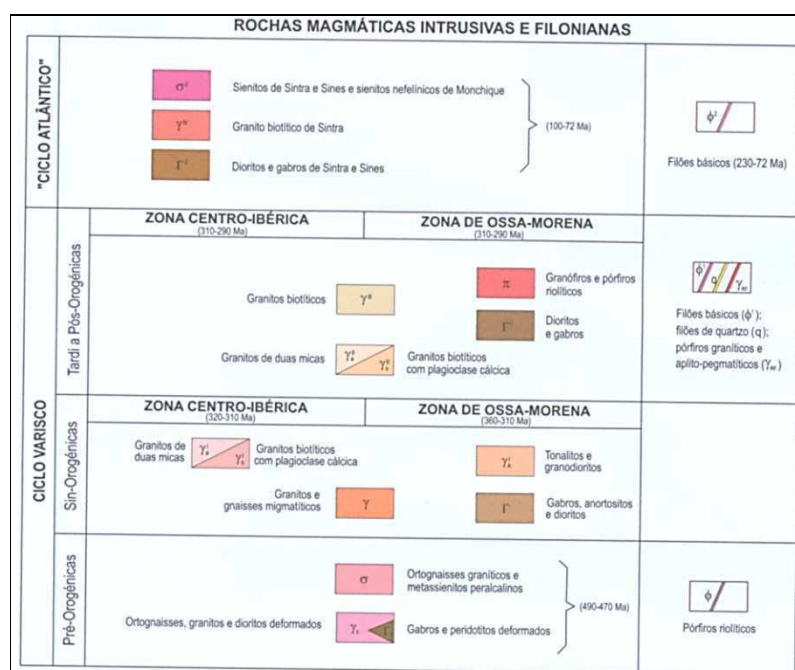


Figura 2.3- Infografia da legenda para as rochas magmáticas intrusivas e filonianas, nas quais se enquadra o CIB, extrato (LNEG, 2010)

A ZOM integra as unidades tectono-estratigráficas mais a sul daquele Maciço, unidades estas definidas por Lotze (Lotze, 1945). A ZOM tem também sido interpretada como um terreno poliorogénico acrecionado à Zona Centro-Ibérica durante a orogenia Cadomiana (620-530 Ma) cuja sutura pode ser observada ao longo da zona de cisalhamento Porto – Badajoz – Córdoba (Quesada *et al.*, 2006).

Segundo Quesada *et al.* (*op. cit.*), a evolução geodinâmica da ZOM contou ainda com a ocorrência de um evento de *rifting* que culminou na formação de uma nova crosta oceânica – do Oceano Reico, durante o Câmbrio-Ordovício, ao qual se seguiu um estado de margem passiva até ao início da orogenia Varisca, no Devónico médio. Nessa altura ter-se-ia iniciado a colisão oblíqua entre o recém-formado oceano e a ZOM, com acreção e eventual obdução de fragmentos oceânicos que se materializam hoje nos terrenos do prisma acrecionário do Pulo do Lobo e no COBA. A subducção da crosta oceânica conduziu finalmente à colisão oblíqua entre a ZOM e a Zona Sul Portuguesa (ZSP), que terá decorrido desde o final do Devónico até ao final do Viséano.

A todo este processo está associado o plutonismo Varisco. Ainda segundo Quesada *et al.* (*ib.*), este plutonismo da ZOM é caracterizado por composições calco alcalinas intermédias a ácidas, originando desde tonalitos a granodioritos, passando por granitos e leucogranitos, até plutões de gabros, sendo estes últimos volumetricamente menos representativos. Embora ainda não exista consenso entre os diversos investigadores quer quanto à evolução geodinâmica da ZOM, durante as orogenias Cadomiana e Varisca (Jesus *et al.*, 2007), quer quanto à exatidão temporal da atividade magmática que originou o CIB, é irrefutável a relação entre esta atividade magmática e a orogenia Varisca, na colisão continental oblíqua entre a ZOM e a ZSP.

Durante muito tempo foi aceite a relação entre a instalação do CIB e os magmas de origem mantélica, que ascenderam durante a subducção da crosta oceânica como resultado da colisão, entre a ZOM e a ZSP (*op. cit.*). (Pin *et al.*, 1999) questionam a representatividade das datações obtidas para a cristalização dos gabros do CIB e, recorrendo a datação U-Pb em zircões e estudos dos isótopos Sr-Nd nessas rochas, concluem que os gabros do CIB não têm assinaturas isotópicas que permitam a sua relação com o regime compressivo, mas antes com um regime distensivo, provavelmente transtensional, de há cerca de 350 Ma (Tournaisiano superior).

A CIB é uma estrutura alongada, constituída por rochas intrusivas, com aproximadamente 100 km de extensão, prolongando-se desde Vendas Novas, a poente, até Serpa, a nascente (figura 2.2). Integra uma associação de rochas variadas, sendo composto por maciços gabróicos, gabrodioríticos e granodioríticos (Pedro *et al.*, 2006).

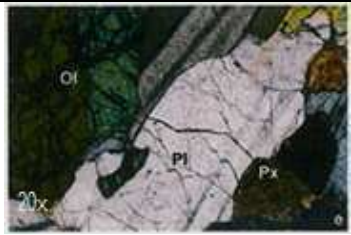
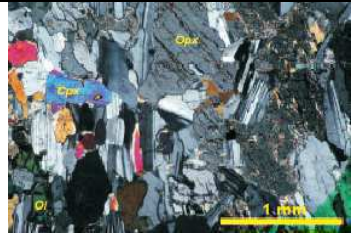
Andrade (Andrade *et al.*, 1976) questiona se a variabilidade litológica do CIB decorrerá da existência de duas câmaras magmáticas diferentes mas coexistentes, ou de uma mesma câmara com líquidos, isto é magmas básicos e ácidos, imiscíveis.

O CIB é dividido em três unidades: a Sequência Gabróica Bandada (SGB), o Complexo de Cuba - Alvito e o Complexo dos Pórfiros de Baleizão (Andrade, 1981), (Andrade, 1984) e (Jesus *et al.*, 2003a). A SGB é constituída por uma grande diversidade de rochas gabróicas bordejadas por dioritos heterogêneos. O Complexo de Cuba-Alvito é composto maioritariamente por uma sequência de rochas desde o gabro até (grano)dioritos. As rochas granitóides são as que caracterizam o Complexo dos Pórfiros de Baleizão (Jesus *et al.*, 2007).

A designação de SGB para os anteriormente designados Gabros de Beja é justificada por (Jesus *et al.*, 2003b) considerando a representatividade da estrutura bandada (*layering*) associada a laminação magmática e gradação mineral apresentadas por estes gabros. Anteriormente, já (Celestino Silva *et al.*, 1970) tinham identificado a estrutura bandada nestas litologias.

A tabela 2.1 resume as principais características microscópicas e petrográficas destes gabros, segundo vários autores. Estas descrições revelam-se bastante semelhantes e consistentes com as descrições disponíveis para os gabros na bibliografia genérica (MacKenzie & Guilford, 1996). Uma vez que a unidade em que se inserem os gabros das descrições apresentadas é a mesma da área investigada, será de esperar que estes resultados se possam aplicar aos gabros em estudo. Recorde-se que se apresentam as características genéricas dos gabros, não se referindo os aspetos particulares das litologias de gabros piroxénico, anfibólicos ou leucogabros.

Tabela 2.1 – Resumo das principais características microscópicas dos gabros entre Odivelas e Beringel

Fonte	(Santos <i>et al.</i> , 1990)	(Simão, 2003)	(Jesus, 2011)
Descrição microscópica	Rochas melanocratas, grão médio, textura granular xenomórfica	Gabro holocristalino, textura hipautomórfica granular, cumulada típica	Gabro piroxénico, grão médio a grosseiro, textura hipidiomórfica
Minerais essenciais	Plagioclases, piroxena e olivina	Plagioclase (66%), clinopiroxena – augite (24%), olivina magnesiânica (8%)	Plagioclases, piroxena e olivina
Minerais acessórios	Horneblenda, opacos, anfíbola secundária e clorite	Biotite, horneblenda, ortopiroxena, opacos, óxidos de ferro e serpentina	Horneblenda, magnetite, ilmenite e sulfuretos: pirrotite, calcopirite
Infografia de exemplo em nicóis cruzados (NX)	Não disponível		

Ol – olivina; Pl – plagioclase, Px – piroxena; Opx – ortopiroxena; Cpx – clinopiroxena

Jesus (Jesus, 2011) considera que a recente designação de SGB introduz na caracterização mineralógica e petrográfica um cariz também estrutural.

A SGB pode ser dividida em dois compartimentos (Jesus *et al.*, 2006) separados pela Falha de Odemira - Ávila: o compartimento ocidental, desde Torrão até Beringel, e o compartimento oriental, entre Beringel e Serpa. É neste último que se incluem os terrenos objeto da presente investigação. Apesar de cada um destes sectores poder apresentar orientações de bandado características devido a perturbações tectónicas locais, de uma forma genérica Jesus (*ib.*) indica-lhe como orientação predominante NNW-SSE a WNW-ESE, inclinando 25° - 35° para SSW.

O sector ocidental da SGB, o mais bem estudado do ponto de vista geológico, inclui uma sucessão de rochas gabróicas agrupadas por (Jesus, 2011) em sete séries, resultantes de reabastecimentos magmáticos sequenciais. De NW para SE, aquela autora define Soberanas (SB) I e II, Odivelas (ODV) I, II e III e Beringel (BRG) I e II. É ainda identificado um oitavo conjunto denominado Grupo de Bordadura (BG) que bordeja a porção poente do sector Ferreira-Beringel, e é composto por uma grande variedade de litologias entre as quais se incluem anortositos e troctólitos. Os sectores foram algumas vezes divididos em grupos, como no sector Beringel onde se identifica o Grupo Basal, Grupo Inferior (LGS), Grupo Intermédio e Grupo Superior. A figura 2.4 ilustra a sequência litológica do sector Ferreira – Beringel, o mais próximo da área em estudo na presente investigação (figura 2.5).

Para além das rochas gabróicas da série de Beringel da SGB, leucogabros olivínicos, gabros olivínicos, gabros piroxénicos, microgabros e diques pegmatoides de gabros anfibólicos; Jesus (Jesus, 2011) refere também a presença de rochas félsicas. Estas estão maioritariamente associadas a diques e lacólicos de feldspato, predominantemente potássico, e quartzo, claramente intrusivos na SGB e que poderão estar relacionados com as origens do Complexo dos Pórfiros de Baleizão. Litologias dioríticas, granodioríticas (Pacheco dos Santos, 1990) e tonalíticas são também referidas, na região Alfundão-Peroguarda (figura 2.5), como associadas ao grupo marginal daquele que se supõe ser um arco magmático orogénico.

Geologicamente, o compartimento oriental é caracterizado pela heterogeneidade das litologias gabróicas: gabros olivínico-piroxénicos, de textura maciça ou apresentando bandado magmático (*layering*) e anortositos, e gabros anfibólicos.

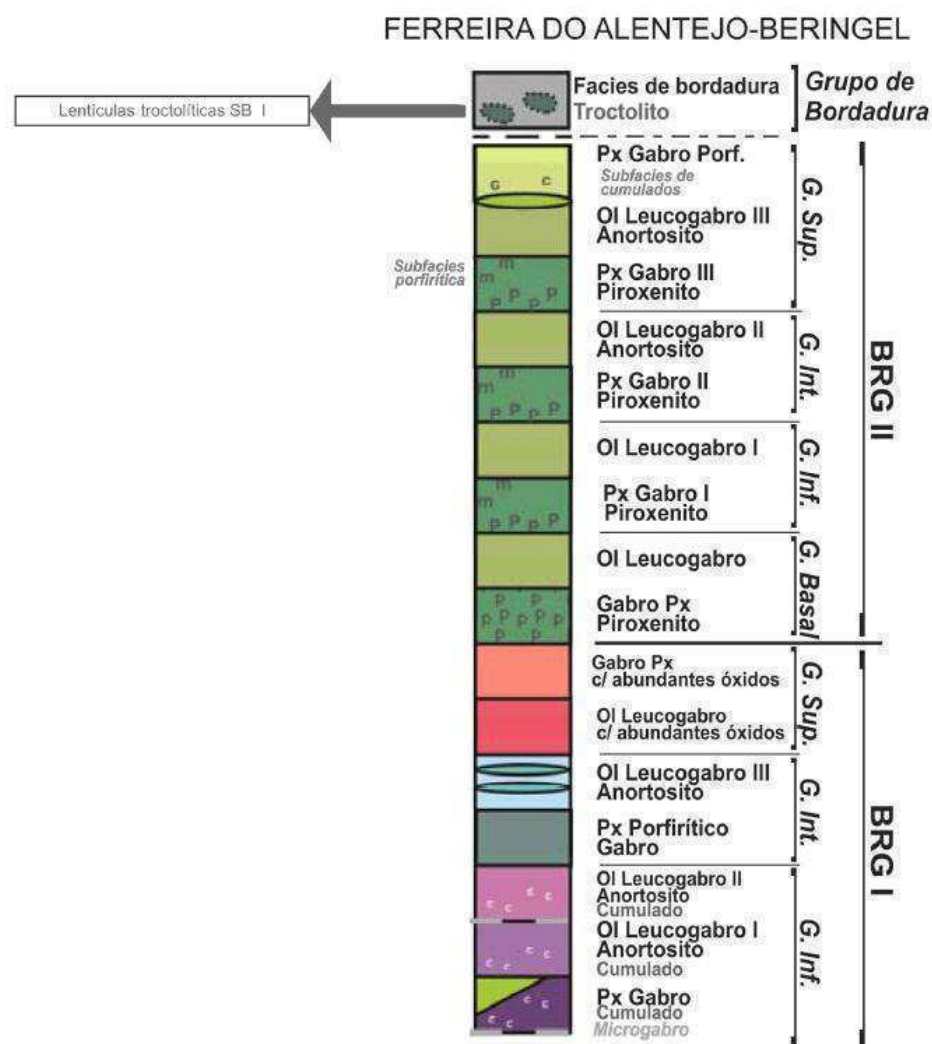


Figura 2.4 - Coluna litológica sintética do setor Ferreira do Alentejo – Beringel, do compartimento ocidental da SGB, modificado de (Jesus *et al.*, 2006) e (Mateus *et al.*, 2010)

A constituição e o arranjo interno da SGB denotam, como anteriormente referido, uma génese necessariamente dependente da evolução geodinâmica experimentada pelo bordo SW da ZOM durante a colisão continental Varisca. Neste contexto, alguns autores (Mateus *et al.*, 2010) justificam que a manutenção de um regime térmico elevado e prolongado ao longo daquele bordo da ZOM é suportada pelo avanço da subducção do Oceano Reico, logo após o fecho da bacia oceânica marginal (390 - 370 Ma), seguida da colisão continental transpressiva e orogénese Varisca (350-300 Ma) e a ascensão dos magmas é imputada à progressão de mecanismos desencadeados por *slab break-off* na zona de subducção.

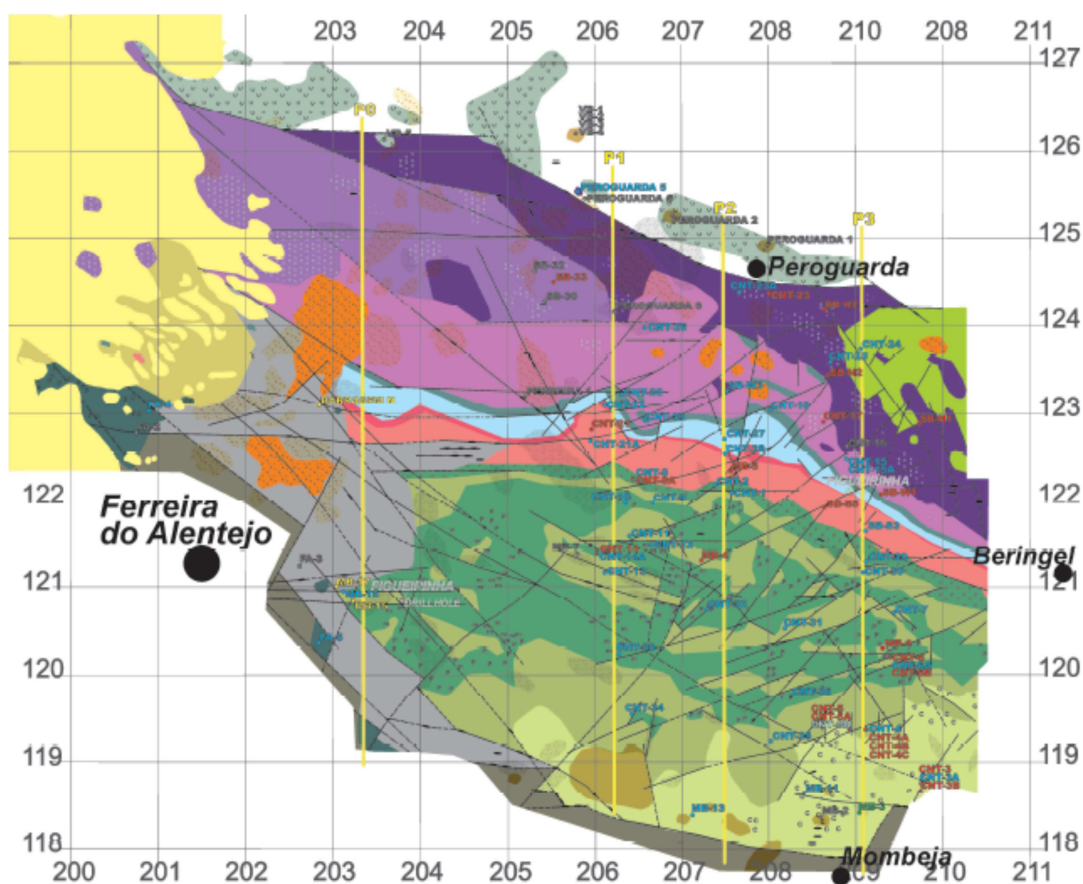


Figura 2.5 – Infografia da cartografia geológica do sector Ferreira do Alentejo – Beringel, compartimento ocidental da SGB, onde se identifica a expressão cartográfica das litologias da figura 2.4. e que corresponde à respetiva legenda; elipsoide Gauss Internacional, datum Lisboa, modificado de (Jesus, 2011)

Assumiu-se desde o início desta investigação que, à falta de estudos detalhados sobre o compartimento nascente da SGB, as litologias descritas na bibliografia para o compartimento poente poderiam encontrar continuidade e semelhança. Foram efetuados levantamentos de campo, genéricos e no contexto da engenharia geológica, e desses registos litológicos se dará conta nos capítulos seguintes.

Na cartografia geológica publicada, nomeadamente na folha número 8 da Carta Geológica de Portugal, 1/200.000, a área em estudo encontra-se englobada na unidade ‘Gabros de Beja’, inserida por sua vez no ‘Complexo plutónico-vulcânico de Odivelas’, do ‘Maciço de Beja’ (Oliveira - Coordenação, 1988) e (Oliveira - Coordenação, 1992), figura 2.6.

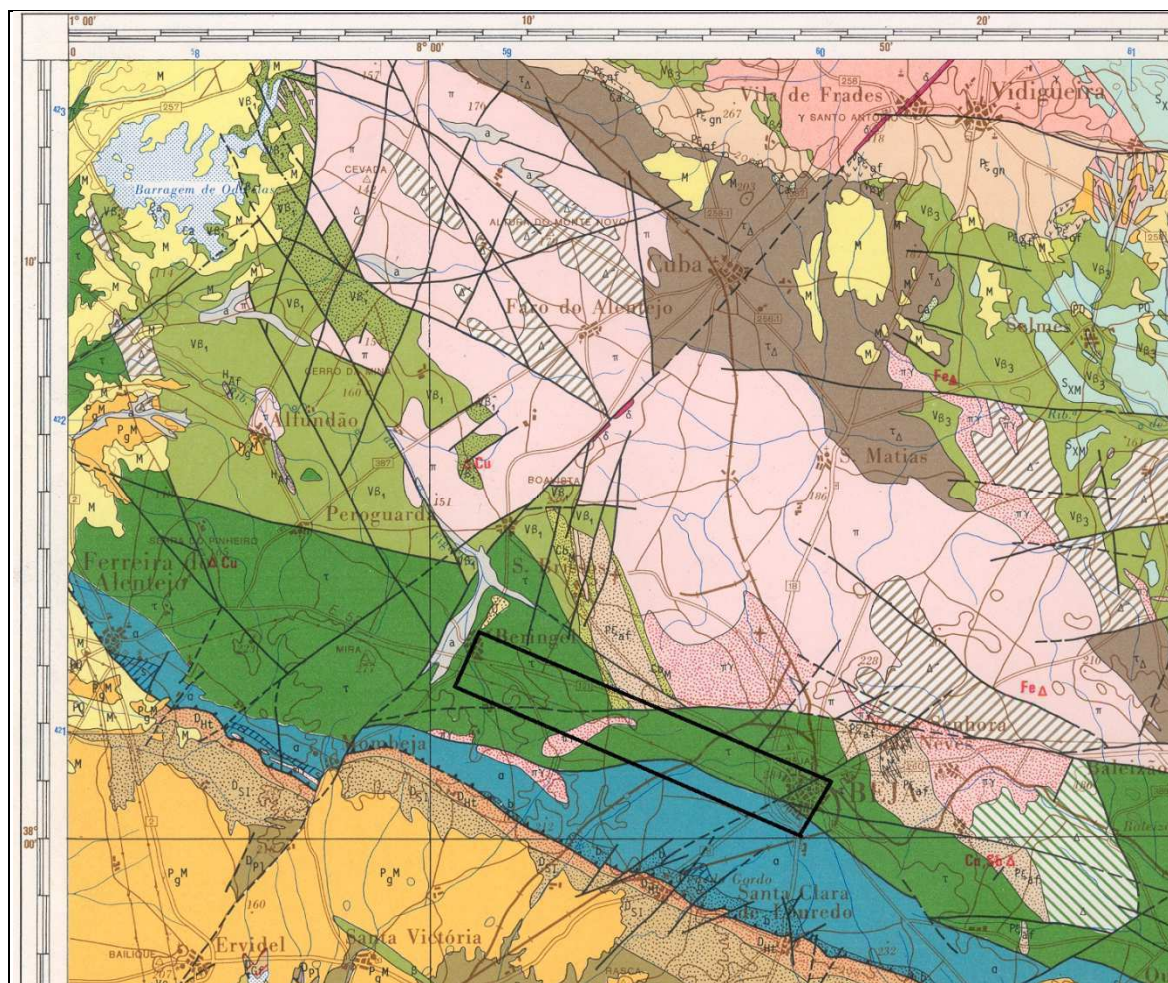


Figura 2.6 – Infografia da carta geológica de Portugal, folha 8, escala original 1/200.000 (Oliveira - Coordenação, 1988), onde se assinala a área em estudo, abrangendo o CIB, a verde escuro, e o COBA, a azul

Na delegação de Beja do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) existe ainda uma carta geológica elaborada para a cidade de Beja, à escala 1/25. 000, datada de 1977 (Goinhas, 1977), que não se encontra publicada (figura 2.7 onde se assinala num polígono aberto a área em estudo coberta por esta carta). Esta cartografia foi utilizada no presente trabalho como elemento de suporte ao levantamento de terreno realizado.

No geral e face aos elementos recolhidos, ficaram evidentes as necessidades de atualização da cartografia, nomeadamente no que diz respeito à distribuição espacial dos calços, à individualização das litologias que constituem a SGB e à definição do limite entre esta e o COBA, principalmente a sul da cidade de Beja.

Tectonicamente, consideram-se na área em estudo dois importantes acidentes de 1ª ordem: o cavalgamento de Ferreira – Ficalho, aqui com orientação N-NW, que define a transição entre o COBA e a ZSP, e a falha de Odemira – Ávila, também designada de falha da Messejana, com cerca de

530 km de extensão, que limita a área investigada a ocidente. Esta última fratura é uma estrutura profunda, que ainda apresenta atividade sísmica.

Salienta-se ainda a denominada falha de Beja, que se desenvolve segundo uma direção próxima de E-W e delimita, a Norte, a área em referência.

Jesus (Jesus, 2011) refere três grandes grupos de deformação Varisca como os mais importantes para o CIB:

- a) Sistemas NNE-SSW a NE-SE, associados à falha Odemira-Ávila;
- b) Sistemas ENE-WSW, aos quais se encontram associados preenchimentos de calcite;
- c) Sistemas NNW-SSE, localmente NW-SE, e sistemas N-S, associados a estados tardios de deformação.

Estes sistemas serão objeto de análise no capítulo 4 no âmbito dos resultados registados nos levantamentos de terreno empreendidos nesta investigação.

2.2.2. Geomorfologia

A área investigada desenvolve-se essencialmente a cotas próximas dos 200 m, ultrapassando pontualmente 250 m. Está-se perante uma zona de planície apenas interrompida por relevos residuais pouco importantes, como alguns morros na cidade de Beja e suas proximidades e pela serra de Beringel (Oliveira - Coordenação, 1992). Esta última e apesar das fracas referências na bibliografia, parece ser o resultado de uma tectónica de tipo *horst-graben*, associada a falhas de orientação predominante E-W, que deram origem às elevações do Cabeço do Outeiro (figura 2.8) (IGE, 509 - Ferreira do Alentejo, 2000), Cabeço da Corte Garrana e Cabeço da Serpe (IGE, 520, Ervidel (Aljustrel), 1999). Neste último regista-se a existência de uma pequena exploração de gabro abandonada, com afloramentos interessantes desta rocha.



Figura 2.8 – Vista do vale da falha Odemira- Ávila (assinalada na figura), desde a elevação do Cabeço do Outeiro, conhecido localmente por Outeiro do Circo, com a albufeira da barragem do Pisão, Beringel, ao fundo

A área em análise encontra-se ladeada pelas bacias hidrográficas do Sado (a poente) e do Guadiana (a nascente), como se pode verificar pela análise da figura 2.9. onde se ilustra a planície envolvente à cidade de Beja, com cotas que raramente ultrapassam os 200 m (cota mais baixa próxima dos 190 mm, junto à localidade de Beringel e cota mais alta, junto à cidade de Beja, próxima dos 250m), num esboço geomorfológico (Brum Ferreira, 1981).

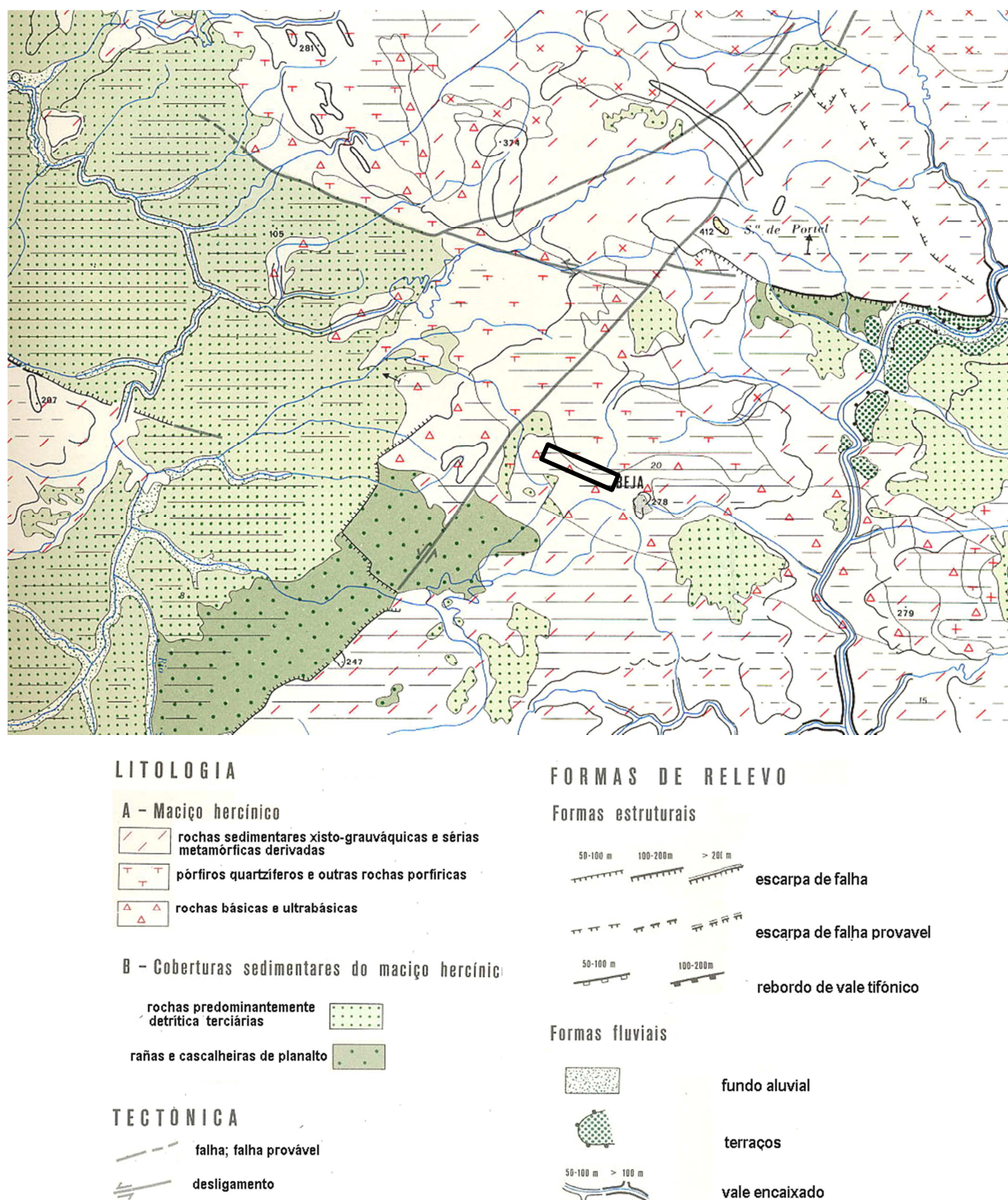


Figura 2.9– Infografia do mapa morfológico do Alentejo de (Brum Ferreira, 1981), onde se assinala a área em estudo, elaborado na escala original de 1/500.000

O gabro pode surgir, localmente, pouco meteorizado, num modelado típico em forma de “bolas” ou de blocos resistentes isolados da rocha mãe por três sistemas de diaclases de atitude ortogonal entre si. Os solos residuais formados a partir do gabro, encontram-se quase sempre em contacto directo com a rocha mãe, devendo a sua génese maioritariamente à ação direta do desgaste mecânico do

gabro, e normalmente apresentam possança reduzida. Estes solos caracterizam-se por não terem matéria orgânica, apresentam uma textura grosseira pouco meteorizada, cor entre cinzento e acastanhado (pardo) e revelam fraca plasticidade. Este último facto relaciona-se com a composição mais siltosa do que argilosa da fração fina. A meteorização química na génese destes solos parece, com base em observações *in situ*, menos relevante e é representada por minerais de argila que derivam de outros menos estáveis, como alguns minerais máficos, de filões ácidos, essencialmente de feldspatos potássicos, e de alguns carbonatos. Estes solos designam-se, segundo a classificação de solos de Portugal, de litossolos (Carvalho-Cardoso, 1965).

Quando a meteorização química predomina, ocorre a formação de solos escuros e argilosos conhecidos em termos agrícolas por “barros de Beja”. Estes são designados, segundo a mesma classificação de solos (*op. cit.*), de aluviosolos. São solos que, claramente, devem a sua génese à presença de rochas básicas e à ação da meteorização química. Os locais onde se identificou maior espessura para estes solos coincidiram, invariavelmente, com locais de drenagem deficiente, elemento facilitador da meteorização. São solos negros, expansivos e de baixa permeabilidade. Cardoso (Carvalho-Cardoso, 1965) designa-os de Barros Pretos e descreve-os como solos evoluídos, de cor escura, argilosos e com apreciável percentagem de colóides minerais do grupo dos montmorilonóides. O mesmo autor refere os fenómenos de retração e expansão, de fendilhamento e de deslizamento, característicos destes solos e salienta que a sua textura argilosa e a baixa permeabilidade tornam estes Barros Pretos muito suscetíveis à erosão. São solos, contudo, muito pobres em matéria orgânica.

2.2.3. Hidrogeologia

Da rede hidrográfica da região em estudo fazem parte várias ribeiras e barrancos que, na sua maioria, se encontram secos durante as estações menos chuvosas. O Sistema Aquífero dos Gabros de Beja é um aquífero livre que segue o modelado topográfico (Peralta, 2001).

Segundo Duque (Duque & Almeida, 1998), este Sistema (figura 2.10) embora seja pouco fundo, 4 a 5 m de profundidade na época chuvosa, traduz uma boa produtividade, com médias de 5 l/s, melhorando para profundidades da ordem de 20 a 30 m, onde se atingem valores de cerca de 36 l/s. Os bons resultados deste aquífero devem-se à elevada fracturação e meteorização das rochas gabro-dioríticas do CIB.

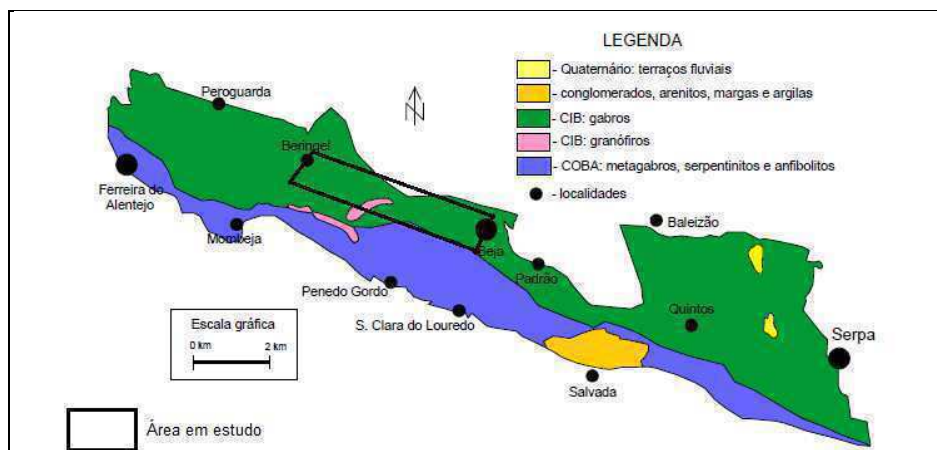


Figura 2.10 – Infografia do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja onde se assinala a área em estudo, modificado de (Duque & Almeida, 1998)

Peralta (Peralta, 2001) define no perfil tipo a seguinte sequência, de cima para baixo:

- Terra vegetal;
- Argilas residuais de meteorização dos gabro-dioritos, às vezes com algumas zonas de impregnação margosas ou mesmo calcárias, sobretudo na parte superior – pouco permeáveis;
- Gabro-dioritos muito alterados e decompostos, geralmente com fraturas preenchidas por produtos argilosos – pouco permeáveis;
- Gabro-dioritos pouco alterados mas fraturados, às vezes com diaclases apresentando produtos cloríticos ou serpentinosos – permeabilidade variável;
- Gabro- diorito são – geralmente impermeáveis.

É o horizonte (d), de profundidade variável que, devido à elevada fracturação, demonstra os valores mais interessantes de permeabilidade e, por conseguinte, de produtividade hidráulica.

Chama-se à atenção da zona (b) da sequência que combina as argilas residuais com as impregnações margosas, correspondendo estas últimas a caliços. Embora do ponto de vista hidrogeológico possam manifestar propriedades semelhantes e possam ser associados, são distintos no que diz respeito à sua origem, como referido anteriormente.

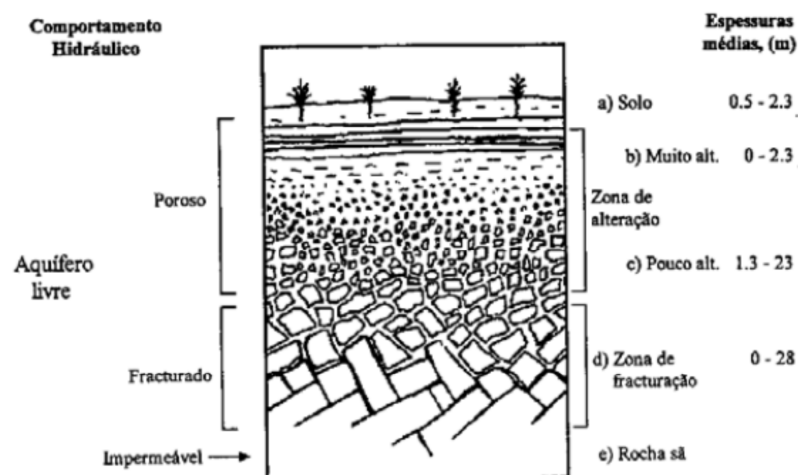


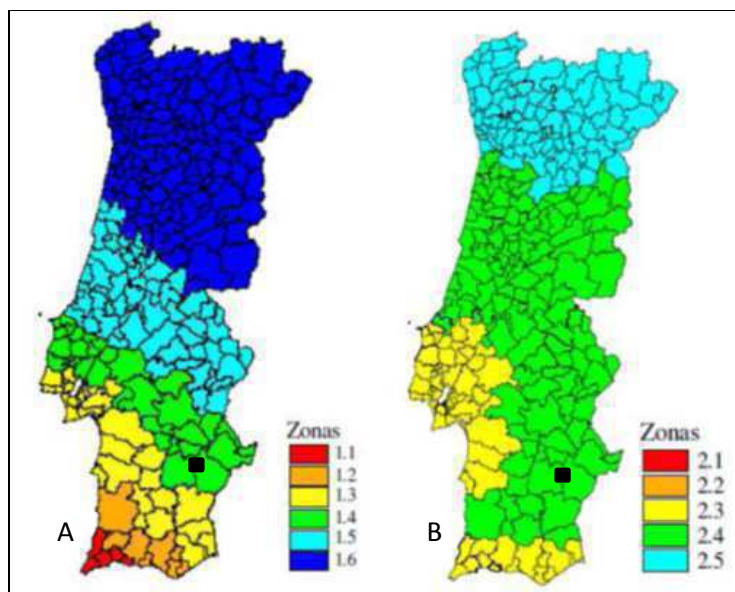
Figura 2.11 – Perfil de meteorização de um gabro-diorito do CIB e respetivo comportamento hidráulico (Peralta, 2001)

2.2.4. Neotectónica e sismicidade

O Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1, 2010) apresenta um zonamento sísmico para Portugal que define determinadas regras a serem adotadas na construção, em função da região sísmica correspondente. Esta quantificação da ação sísmica, divide o país em zonas, sendo evidente uma sismicidade crescente de Norte para Sul (figura 2.12). O zonamento é baseado no comportamento dos solos em função da magnitude e da distância ao foco.

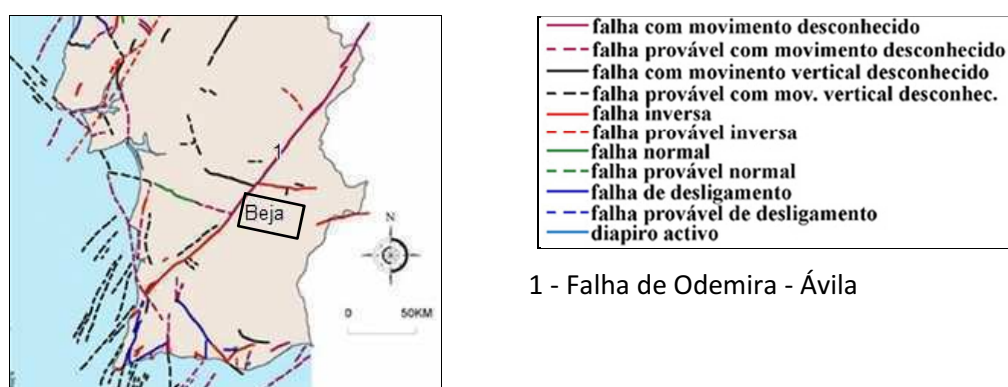
A ação sísmica de tipo 1 representa os sismos de grande magnitude, maior distância ao foco e frequências baixas, enquanto a ação sísmica de tipo 2 representa os sismos de menor magnitude, reduzida distância ao foco e frequências elevadas. A área em estudo enquadra-se nas zonas 1.4 e 2.4, respetivamente para ação sísmica tipo 1 e ação sísmica tipo 2.

As zonas sismogénicas em Portugal Continental dividem-se em interplacas e intraplacas. Para o primeiro caso, considera-se a zona de fronteira das placas euroasiática e africana, com sismos associados a movimentos ao longo da falha Açores-Gibraltar; são sismos com uma origem distante, da ordem das centenas de quilómetros e profundidades focais da ordem das quatro a cinco dezenas de quilómetros (Mineiro, 1994),(Coelho, 1998). No segundo caso, os sismos são gerados no interior da placa euroasiática; são sismos próximos, com distâncias epicentrais da ordem das poucas dezenas de quilómetros e profundidades focais da ordem das duas dezenas de quilómetros (Coelho, 1998). De salientar, neste segundo caso, a já referida a falha de Odemira-Ávila, figura 2.13.



A - Ação sísmica tipo 1, sismo afastado, interplacas; B – Ação sísmica tipo 2, sismo próximo, intraplacas

Figura 2.12 – Infografia do zonamento sísmico em Portugal Continental, onde se assinala a preto a localização de Beja (NP EN 1998-1, 2010)



1 - Falha de Odemira - Ávila

Figura 2.13 – Infografia de extrato da Carta Neotectónica de Portugal Continental, escala original 1/1.000.000, modificado de (Cabral & Ribeiro, 1988) *in* (Dias, 2011)

2.2.5. Informação disponível em relatórios técnicos

A pesquisa bibliográfica de informação geotécnica da região em apreço incluiu a consulta junto de entidades locais como Câmara Municipal, o Arquivo Municipal, a empresa Estradas de Portugal (delegação de Beja), a Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva S.A. – EDIA, e empresas de construção civil da região, na Biblioteca do atual LNEG, quer em Alfragide, quer na delegação de Beja deste Instituto, onde foram consultadas cartas de intensidade magnética e resistividade aparente, inseridas em projetos mineiros na área de Beja (Rio Narcea, 2004, Não publicado) e (Rio Narcea, 2008, Não publicado).

Foram ainda solicitados alguns relatórios a entidades oficiais como a Direção Regional de Educação do Alentejo e a Direção Regional de Saúde. Desta recolha de informação constam a consulta e análise de 32 relatórios, relativos a estudos geológicos e geotécnicos realizados entre Abril de 1964 e Julho de 2010 (Anexo I) e cuja localização na área interessada se encontra esboçada na figura 2.14.

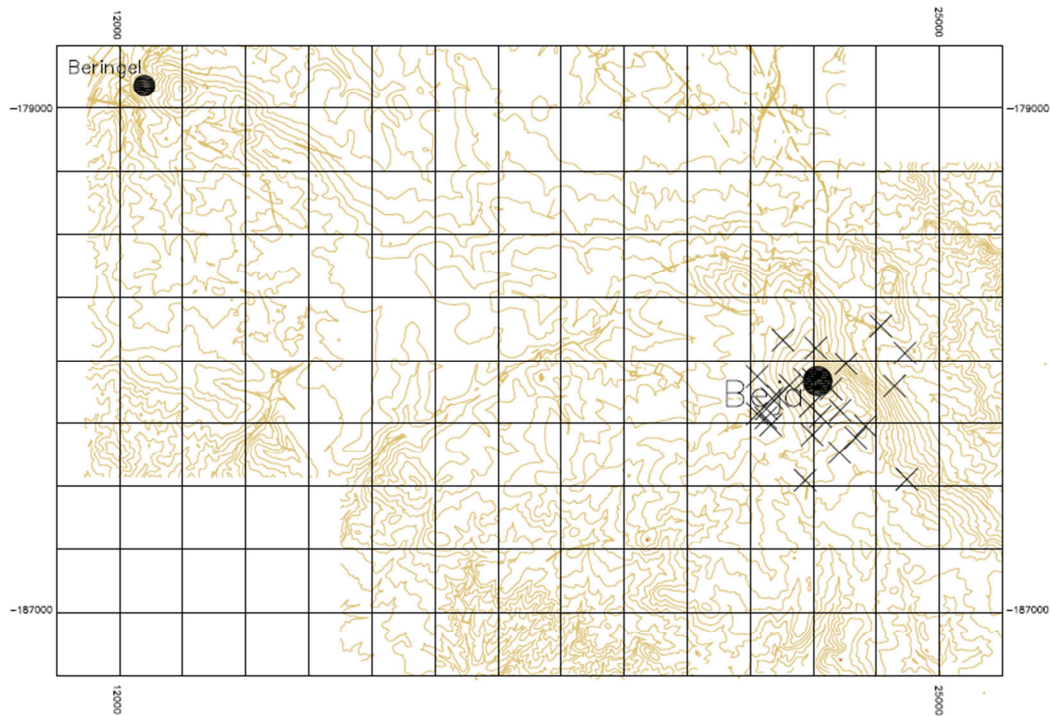


Figura 2.14 – Esboço da distribuição espacial dos locais envolvidos nos estudos dos relatórios consultados para a área em investigação, em fundo topográfico (equidistância de curvas de nível de 10 metros)

Na figura não se encontram representados os locais correspondentes a obras na envolvente da área investigada, como são o caso das obras da barragem do Pisão, a norte de Beringel, do aeroporto de Beja, a norte da cidade de Beja, e da estrada da Salvada, a cerca de 10km para SW de Beja.

Utilizaram-se também resultados mais recentes de investigações anteriores, publicados (Soares & Ferreira, 2006) e (Soares *et al.*, 2010) e não publicados (Soares, 2011).

Os relatórios geotécnicos fornecem a informação detalhada de estudos locais, disponibilizada pelos respetivos Donos de Obra. Valem pela informação específica que sintetizam e pelos ensaios *in situ* que, de outra forma, dificilmente se conseguiriam obter para complementar o contributo para a caracterização geotécnica pretendida nesta Tese.

Constata-se que, na grande maioria dos relatórios consultados (81%), a informação geotécnica é obtida através de sondagens e ensaios SPT. Para algumas situações pontuais (13%) são ainda

fornecidas informações sobre classificação de solos e, eventualmente, alguns resultados de ensaios de previsão de comportamento, como Proctor e CBR (*Californian Bearing Ratio*).

Os relatórios geotécnicos que aqui se referem não contemplam ensaios de campo ou laboratoriais mais detalhados, como sejam ensaios de corte ou ensaios triaxiais. Apenas em um dos estudos consultados (CEGSA, 1999) se encontra referência a ensaios de compressão uniaxial em rocha, mas acompanhados da observação de que “...os valores são meramente indicativos, porque os provetes não reuniam as condições exigidas para a realização do ensaio...”, facto pelo qual não foram considerados nesta investigação.

Com o objetivo de comparar ulteriormente com os resultados da caracterização de solos efetuados no âmbito desta Tese, sintetizam-se na tabela 2.2, os valores obtidos nos relatórios consultados, depois de validados pela autora.

Tabela 2.2 – Síntese dos resultados dos ensaios de identificação em solos dos relatórios consultados

Fonte		(C. M. Beja, 2002)	(CEGSA, 1999)		(Geocontrolo, 2006b)			(Geocontrolo, 1991)	
Profundidade (m)		--	3,0-3,5	3,0	1,5	3,0	6,0	0,20-1,0	0,80 – 3,0
Material passado no peneiro ASTM (%)	nº 4	94,4	81,0	80,0	92,0	96,0	98,0	2,0	76,0
	nº 10	88,6	62,9	73,0	72,0	91,0	93,0	4,0	88,0
	nº 40	79,5	31,0	51,0	41,0	75,0	72,0	9,0	94,0
	nº 200	67,9	12,5	32,5	24,0	55,0	45,0	13,0	97,0
Limite liquidez (%)		51	--	--	28	39	40	58	--
Índice de plasticidade (%)		29	NP	NP	6	20	22	27	NP
Classificação	AASHTO	A-7-6 (16)	A-1-b (0)	A-2-4 (0)	A-1-b (0)	A-6 (8)	A-6 (6)	A-2-7 (0)	A-4 (0)
	USCS	CH, argila gorda arenosa	SM, areia siltosa com cascalho	SM, areia siltosa com cascalho	SM, areia siltosa com cascalho	CL, argila magra arenosa	SC, areia argilosa	GC, cascalho argiloso	ML, silte com cascalho

Pela observação da tabela 2.2 podem identificar-se 2 grupos diferentes de solos: solos grosseiros, areia siltosa com cascalho, areia argilosa e cascalho argiloso, e solos finos nos quais se incluem as argilas e o silte, embora sempre acompanhados de uma fração mais grosseira de areia ou mesmo cascalho entre os 15 a 30%. A presença de SC, areia argilosa entre os solos residuais dos gabros tinha anteriormente sido assinalada na tabela 1.10, na classificação dos solos residuais de gabros do Maciço de Sines.

Na tabela 2.3 resumem-se os valores indicados para o ensaio de compactação, Proctor modificado, realizado em quatro amostras distintas, mencionados num dos relatórios consultados (Geocontrolo, 1991). Os resultados traduzem valores ótimos de compactação para solos com pequena fração argilosa dado que o teor ótimo de água não se revela muito elevado. São valores expetáveis para solos classificados como areias ou cascalhos argilosos ou mesmo siltes com cascalho.

Tabela 2.3 – Resumo dos resultados dos ensaios de compactação, Proctor modificado, de um dos relatórios consultados (Geocontrole, 1991)

Parâmetros	máximo	mínimo	média	desvio padrão
γ_{dmax} (kN/m ³)	19,9	17,9	19,0	0,69
w _{opt} (%)	14,3	10,9	12,8	1,23

Regra geral, verifica-se que a maioria dos parâmetros geotécnicos apresentados nos relatórios técnicos coligidos são estimados com base nos valores obtidos nos trabalhos de prospeção e ensaios *in-situ* que, como é sabido, têm um carácter pontual. De acordo com o EC7 (NP EN, 2010), essa extrapolação é em regra admissível em fases de estudo prévio e desde que seja efetuada por um especialista com experiência comparável e um conhecimento prévio dos terrenos em referência.

As sondagens de furação à rotação nos estudos geológicos e geotécnicos analisados são geralmente efetuadas a trado oco e acompanhadas da execução de ensaios SPT, espaçados sistematicamente a cada 1,5 m.

O SPT é um ensaio corrente dada a baixa complexidade da sua execução, o seu baixo custo e a diversidade de publicações geotécnicas disponíveis com correlações aceites na comunidade técnica para alguns parâmetros geotécnicos, encontrando-se atualmente normalizado na norma ASTM D1586-08. Este ensaio consiste na cravação no terreno de um amostrador normalizado, pela queda de uma massa de cerca de 63,5 kg, registando-se o número de pancadas necessário para que uma dada penetração no terreno ocorra. O ensaio realiza-se em duas fases, a primeira para uma penetração de 15 cm e a segunda para uma penetração de 30 cm, anotando-se em cada uma, o número de pancadas necessárias à cravação do amostrador normalizado. O resultado do ensaio é traduzido pelo número de pancadas correspondentes à segunda fase. O ensaio considera-se concluído quando, em qualquer uma das fases se alcançam as 60 pancadas, registando-se neste caso a penetração conseguida. Este valor das 60 pancadas é o mais utilizado em Portugal e restante Europa, embora este possa ser superior a 60 pancadas em alguns países. É importante também referir que a norma ASTM refere o valor de 50 pancadas para limite à penetração dos primeiros 15 cm (nega brusca).

O valor de N_{SPT} necessita de correções impostas pelas características do terreno e pelo tipo de equipamento utilizado. As correções mais comuns são as relativas à energia de cravação, à tensão efetiva de recobrimento e ao comprimento das varas utilizadas.

Nos equipamentos com dispositivo de disparo automático, que se assume sejam praticamente todos os casos que se realizam atualmente, a eficiência é igual à normalizada, correspondendo a 60%. Isto significa que apenas 60% da energia potencial (altura de queda multiplicada pela massa) atinge o extremo inferior das varas. Com os resultados desta correção (N_{60}) e recorrendo a correlações disponíveis na bibliografia para solos grosseiros, é possível estimar os valores de parâmetros específicos que, ou não foram de todo avaliados diretamente ou para os quais só se analisaram um reduzido número de amostras. Deste modo e recorrendo a correlações (Matos Fernandes, 2011), podem-se obter estimativas de valores para parâmetros tais como índice de compacidade relativa (D_r), ângulo de atrito (ϕ), peso volúmico (γ) e módulo de deformabilidade (E). Embora as correlações devam ser utilizadas com precaução, considerando os tipos de terreno para os quais se aplicam e a experiência comparável, estão hoje largamente implementadas e são suportadas por inúmeros ensaios e estudos realizados por todo o mundo.

A partir dos relatórios geológico-geotécnicos consultados verifica-se, regra geral, que se atingem valores aceitáveis de N_{SPT} para profundidades entre 1,5 m e 3,0 m, onde o maciço gabróico se encontra meteorizado, mas compacto. São exceções a esta situação todas as zonas recobertas por aterros antrópicos e situações pontuais de zonas muito meteorizadas, com falhas e/ou presença de calços. Cada relatório apresenta valores estimados para os parâmetros que caracterizam as formações, exemplo ilustrado na tabela 2.4, não sendo claros na forma de obtenção desses valores, nem indicando as correlações utilizadas. Algumas vezes, nesses relatórios, não chega sequer a ser indicado o tipo de dispositivo utilizado. Por estas razões torna-se pouco fiável a utilização destes valores como contribuição para parâmetros geotécnicos, facto pelo qual não serão considerados para comparação com os valores determinados no presente trabalho.

A título meramente exemplificativo apresentam-se na tabela 2.4 os resultados obtidos para os parâmetros geotécnicos “...para efeitos de dimensionamento de fundações pelo método dos coeficientes parciais, inferidos dos resultados do ensaio SPT, tendo em conta a respetiva representatividade relativa...” (Geocontrolo, 2006b). Estes resultados têm por base seis sondagens com profundidades mínima de 7,60 m e máxima de 9,25 m, onde foram efetuados seis ensaios SPT em cada sondagem.

Tabela 2.4 – Exemplo de valores estimados para alguns parâmetros geotécnicos - peso volúmico, ângulo de atrito interno e coesão em tensões efetivas e módulo de deformabilidade (Geocontrole, 2006b)

Profundidade média (m)	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	E (MPa)
1,5	19	5	32	15
2,5	20	10	34	25
2,5-3,0	21	15	36	30

Os valores apresentados, apesar de estimados, encontram-se dentro dos limites aceitáveis para estes solos arenosos com fração silto-argilosa, derivados de rochas básicas (Diemer *et al.*, 2008).

Investigações efetuadas pela autora (Soares, 2011), abrangeram também nove amostras destes solos que foram submetidas ao ensaio de previsão de comportamento Proctor modificado, que permite antever as condições ideais de trabalhabilidade de solos para construção de aterros. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 2.5 e figura 2.15.

Tabela 2.5 – Resumo dos resultados dos ensaios de compactação Proctor modificado (Soares, 2011)

Grandezas	máximo	mínimo	média	desvio padrão
γ_{dmax} (kN/m ³)	23,1	20,1	21,2	0,96
w_{opt} (%)	12,3	9,9	10,8	0,94

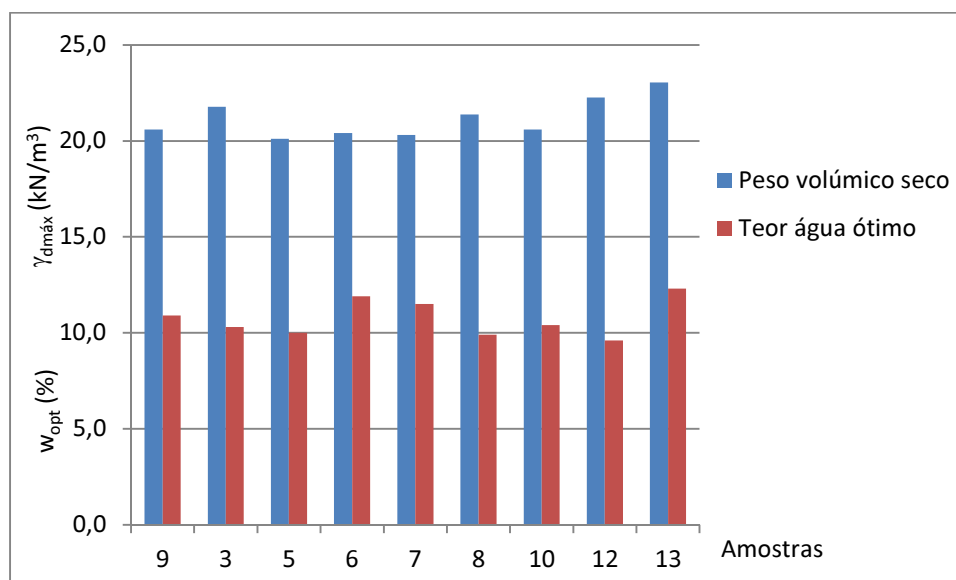


Figura 2.15 – Distribuição dos valores do peso volúmico seco máximo e do teor em água ótimo para ensaios realizados pela autora (Soares, 2011); a identificação das amostras corresponde às do Anexo III

Os valores referidos são concordantes com os da gama de resultados que integram a tabela 2.3, sendo portanto os expetáveis para solos essencialmente arenosos com finos, de plasticidade baixa ou nula.

Cerca de 8km a poente de Beringel e já fora da área em referência, encontra-se a pedreira de Monte da Serra, explorada pela empresa Serrabritas, Lda. Uma vez que esta ainda se encontra no CIB e que os inertes extraídos são maioritariamente de gabro, resume-se na tabela 2.6 a caracterização efetuada pelo laboratório da referida empresa (Serrabritas, 2001), que inclui ensaios de comportamento como o ensaio de desgaste Los Angeles.

Tabela 2.6 - Valores de caracterização dos inertes de gabro para fins comerciais (Serrabritas, 2001)

Parâmetro	γ (kN/m ³)	P _e (%)	σ_c (MPa)	Absorção (%)	Desgaste (%)
Rocha gabróica	>29,0	<0,25	>260	<0,15	<20

Os valores da tabela 2.6 em comparação com os valores apresentados para gabros fora de Portugal, tabela 1.6 e os gabros de Sines, tabela 1.9, revelam-se idênticos no que diz respeito ao peso volúmico mas indicam que as rochas ensaiadas são de elevada qualidade, dado que apresentam uma porosidade eficaz baixa e uma resistência à compressão uniaxial bastante elevada. Estas características vão refletir-se no baixo desgaste que apresentam.

Capítulo 3– Métodos de estudo

Como referido anteriormente, aos elementos obtidos por recolha de informação disponível sucedem-se a análise de fotografias aéreas e a realização de um reconhecimento de superfície para definição dos locais de amostragem, a seleção dos materiais a ensaiar e a definição dos ensaios a realizar.

Os trabalhos de campo visaram o levantamento e a identificação dos limites dos gabros com os restantes terrenos da SGB, a definição da sequência do perfil de meteorização, bem como a georreferenciação de afloramentos para eventual amostragem.

Os maciços rochosos, sempre que se conseguiu acesso aos mesmos, foram caracterizados de forma a poderem ser aplicadas as classificações universais. Selecionaram-se e recolheram-se amostras para identificação mineralógica e química, bem como para determinação das propriedades físicas, dinâmicas e de resistência do material rochoso, e para determinação em laboratório das características físicas e mecânicas, dos solos.

Apresentam-se seguidamente as metodologias seguidas para o levantamento de terreno, amostragem e ensaios realizados.

3.1 Caracterização de campo

3.1.1 Reconhecimento de superfície

O conhecimento da geologia da região em que a área em estudo se insere baseou-se essencialmente na informação da cartografia geológica publicada (Oliveira - Coordenação, 1992), (Oliveira - Coordenação, 1988) e (LNEG, 2010) e não publicada (Goinhas, 1977) disponível sobre a matéria.

O recurso à observação e interpretação fotogeológica, incluindo ortofotomapas correspondentes à folha 521, escala 1/25.000, cedidos ao abrigo do programa FIGIEE do IGP, e a mapas de resistividade elétrica e de gravimetria, disponíveis para consulta no LNEG - Beja, forneceram dados com uma aproximação de escala mais viável para os objetivos pretendidos.

Como base topográfica utilizaram-se as cartas militares de Portugal, escala 1:25. 000, folhas 509 - Ferreira do Alentejo, 520 – Ervidel/Aljustrel, e 521 – Beja, série M888, e as folhas, escala 1/10.000, 509_4, 510_3, 521_4 e 520_2, cedidas ao abrigo do programa FIGIEE do IGP, 521_2, 521_3 e 521_4, cedidas pela AMBAAL.

Na georreferenciação de campo recorreu-se à utilização de um dispositivo de GPS do Departamento de Ciências da Terra da FCT-UNL, marca Garmin, com exatidão horizontal entre 3 a 5 m, definido no sistema de coordenadas WGS 84. O levantamento das atitudes das descontinuidades do maciço foi efetuado utilizando bússola de geólogo, marca Silva.

O levantamento de terreno defrontou-se com diversidade litológica e textural, dificuldades de acesso a afloramentos, dada a precariedade de alguns acessos, e a confirmação de que os contactos geológicos não se fazem por linhas retas.

A caracterização geológica que se realizou pretendeu-se que fosse simplificada e geral, no contexto genérico da engenharia geológica, servindo de suporte a um estudo geotécnico e não contribuindo para nenhum conhecimento petrográfico ou mineralógico detalhado.

Considerou-se a SGB como a unidade base e tomou-se como evidente que a diversidade textural e litológica encontrada se devia a diferenciações magmáticas, que deram origem a estas rochas, e a várias fases de instalação, ilustradas por filões de rochas ácidas (quartzo-feldspáticos). Estes factos são representados em contactos litológicos dos gabros com granulometrias diversas ou contactos com litologias distintas (filonianas ou não), sendo exemplo destas últimas os afloramentos de granodiorito a norte da cidade de Beja (Colina do Carmo), figura 3.1 a 3.3.

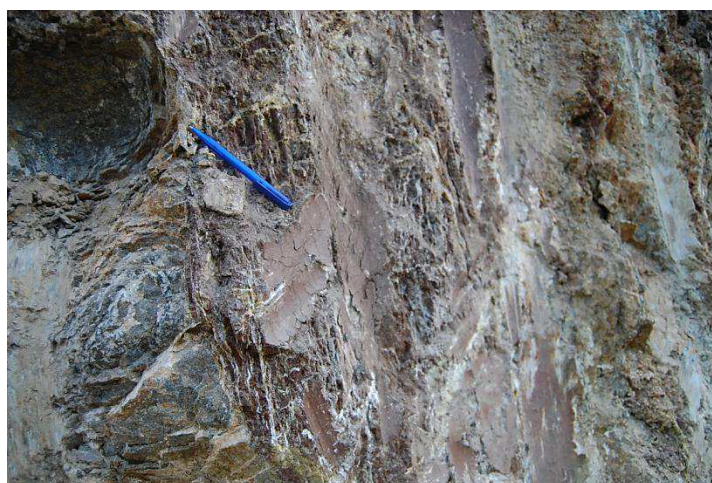


Figura 3.1 – Aspeto de zonas argilificadas e zonas mineralizadas, Colina do Carmo, N38°01,683',W007°51,064'



Figura 3.2 - Pormenor de filonete mineralizado – hematite; Colina do Carmo, N38°01,671', W007°51,086'



Figura 3.3 - Detalhe de zona mineralizada - hematite e provável malaquite, Colina do Carmo, N38°01,683', W007°51,064'

Do levantamento geológico efetuado, há a assinalar o registo de alterações aos limites assinalados na cartografia geológica de Beja à escala 1:25.000 (Goinhas, 1977), tendo sido detetadas litologias até ao momento não cartografadas na zona em estudo, figuras 3.4 a 3.7.



Figura 3.4 - Pormenor de filão de pegmatito no caminho-de-ferro junto à localidade de Penedo Gordo, N37°59,439', W007°54,727'



Figura 3.5 - Pormenor de pegmatito de leucogabro na transição para o COBA, linha caminho-de-ferro junto ao vértice geodésico do Cerejo, N37°57,814, W007°52,976'



Figura 3.6 – Granodioritos (microgranodioritos) na Colina do Carmo, N38°01,683', W007°51,064'



Figura 3.7 - Diorito orientado junto ao vértice geodésico do Cerejo, N37°59,655', W007°53,689'

A evolução geodinâmica desta região condicionou a instalação destes magmas e proporcionou certamente a diversidade geoquímica e mineralógica observadas, já referida e enunciada por vários autores (Celestino Silva *et al.*, 1970), (Mateus *et al.*, 2010) e (Jesus, 2011), para esta mesma unidade, porém, mais concretamente para o compartimento entre Odivelas e Beringel. Não sendo objetivo da presente dissertação contribuir diretamente para este tipo de discussão ou caracterização, a autora abstém-se de extrapolar estas análises para a parte agora em referência da SGB.

Do ponto de vista da engenharia geológica, importava caracterizar todos os afloramentos rochosos e efetuar o levantamento de todos os possíveis locais para recolha de amostras de blocos de rocha ou amostras remexidas e/ou indeformadas de solos.

Nos maciços rochosos foram analisadas as discontinuidades medindo-se a sua orientação, para posteriormente se elaborar a projeção estereográfica e a abertura, espaçamento, rugosidade, preenchimento, a fim de se proceder à determinação expedita em campo do ângulo de atrito das discontinuidades (ϕ). Neste levantamento foi registado ainda o estado de meteorização da rocha e o seu perfil de meteorização, que incluía o registo das espessuras de cada horizonte. Para melhorar a descrição aplicaram-se a BGD - *Basic Geological Description* (ISRM, 1981) e a classificação geomecânica universalmente mais utilizada – o sistema $RMR_{básico}$ - *Rock Mass Rating*, de acordo com (Bieniawski, 1979) e (Bieniawski, 1989).

Foram assinalados todos os afloramentos e escavações, com a caracterização dos materiais expostos, análise da viabilidade para os amostrar e obtenção de fotografias de todos os perfis possíveis, para ulterior interpretação. Foram preenchidas fichas de caracterização dos perfis, previamente desenvolvidas em gabinete com base no trabalho de Ferrer e Vallejo (Vallejo & Ferrer, 2011) e que incluíam a aquisição de diversos dados, figura 3.8, incluindo a respetiva georreferenciação, materiais

e características gerais. Sempre que exequível, descreveram-se as propriedades dos maciços com informações relativas à matriz rochosa, nomeadamente litologia, textura, cor, estado de meteorização, dureza ao resalto aproximada e as descrições das descontinuidades, por serem estas as características que seguiam os requisitos das recomendações da ISRM para a descrição de maciços e permitiriam aplicar as classificações acima indicadas. Ilustram-se no anexo II do presente volume algumas de fichas preenchidas relativas a perfis levantados.

No sentido de tentar, de alguma forma, colmatar a escassez de afloramentos, sempre que possível foram acompanhadas escavações para fundações de edifícios ou outras estruturas, dentro e fora da cidade de Beja, e foram descritos os respetivos perfis de escavações ou, por imposição do ritmo de construção ou permissão de acesso, apenas uma inspeção visual e levantamento fotográfico, figura 3.9. Apenas se referenciam neste trabalho 75 % dos cerca de 30 perfis totais analisados, devido à escassez de informação registada nos perfis não mencionados, decorrente de dificuldades de acesso.

Dentro da cidade de Beja foram acompanhadas as escavações para as fundações de vários edifícios públicos (escolas, extensões hospitalares, lares e centros de dia, bairros sociais) e privados, assim como valas para instalação ou remodelação de infraestruturas (saneamento, gás, telecomunicações) – figura 3.9. Ainda dentro dos limites da região em estudo foi efetuado o acompanhamento da futura área de apoio à autoestrada A8 e do canal de adução Pisão- Beja, que liga a albufeira do Pisão à albufeira de Cinco Reis, ao longo de cerca de 2,5 km de extensão.

A consulta de vários estudos geológico-geotécnicos dentro da área em questão referidos no Capítulo 2, permitiu o acesso a boletins de sondagens que possibilitaram inferir a espessura dos solos de cobertura e a profundidade do substrato rochoso para alguns locais atualmente inacessíveis.

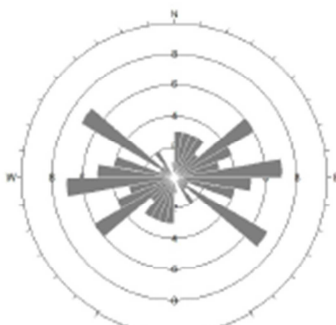
Designação/localização: Tanque dos Cavalos (Beja)		Coordenadas: (WGS 84) N37° 59,946' W007° 50,034'		Data: 2/5/12		Notas:	
Litologia: Gabros muito meteorizados e fraturados, cortado por várias falhas e filonetes de quartzo e feldspato.				Formação: SGB		BGD: GabroL0F3S2A2	
Formações superficiais: Camada pouco possante de solo				Espessuras: solo <15 cm; rocha 8m (altura)		RMR _{básico} = 48 Classe III razoável	
Estrutura (dobras, falhas, fraturas,...) Falhas de movimento normal, que ocorrem na mesma orientação das fraturas. Fraturas num sistema ortogonal		Orientação espacial: N69W;80NE / N270E;vert / N32W;75NE				Q=0,70 Qualidade muito fraca.	
Resistência resalto		Rocha Tipo1 R= 14; RCU – 21 MPa					
Esclerómetro (R)		Rocha Tipo2 R= 45 ; RCU– 125 MPa					
Espaçamento		F1 > 200cm		F2 60-200cm		F3 20-60 cm X	
Abertura		nenhuma		< 0,1 mm		0,1 – 1,0mm	
Continuidade		Muito baixa <1m		Baixa 1-3m X		Média 3-10m	
Presença de água		Seco X		Água intersticial		Húmido	
Grau de meteorização da rocha		Sã W1		Pouco meteorizada W2		Medianamente meteorizada W3 X (tipo 2)	
Resistência matriz rochosa		Extrem. branda Unha 0		Muito branda Navalha 1 X (tipo 1)		Branda Ponta do martelo 2	
Ângulo atrito		> 45°		40° - 45° X		35° - 40°	
Esboço (orientado)		WSW		ENE			
Amostras:		Recolhidas amostras de rocha irregulares para compressão pontual (PLT), com os 2 tipos de meteorização (tipo 1 e tipo 2).					

Figura 3.8 – Exemplo de ficha elaborada a partir da recolha de dados no campo, aplicada ao local designado de “Tanque dos Cavalos”.



A - cruzamento junto à Ovibeja, N38° 00,195'W007°51,337' B – Patronato N38° 1,210'W007°51,900',
C - canal de adução Pisão- Beja N38° 3,431'W007°57,415', D - 2ª fase da ESTIG, N38° 00,943'W007°52,490'
Figura 3.9 - Exemplo de obras de engenharia civil visitadas no âmbito do levantamento de terreno

3.1.2 Amostragem

Na amostragem de materiais geológicos, procedeu-se à recolha de exemplares de solos e rochas para ensaios laboratoriais de caracterização física e mecânica. No caso particular dos solos, acresce a necessidade de se terem colhido amostras não alteradas.

Como referido anteriormente o número de afloramentos disponíveis na área em estudo é bastante reduzido o que condicionou fortemente a amostragem efetuada. Relativamente às rochas gabroicas, o facto de só ter sido possível realizar ensaios *in situ* expeditos com o esclerómetro de tipos L e N, bem como de *tilt*, também limitou a quantidade de informação disponível.

Durante o tempo de realização da presente investigação, a autora teve a oportunidade de coorientar uma tese de mestrado (Gomes, 2011), para a qual colaborou e efetuou a triagem e seleção dos locais de amostragem, que disponibilizaria dados físicos e mecânicos importantes sobre os gabros.

A recolha de amostras obedeceu a um padrão aleatório de distribuição espacial heterogénea, mas garantiu sempre a representatividade das formações a caracterizar, definidas durante o trabalho de levantamento de terreno. Segundo o descrito na seção 1.4.2., implementou-se nesta investigação a

amostragem de observação, a amostragem para confirmação e a amostragem de materiais geológicos (Zuquette & Gandolfi, 2004).

Na amostragem de observação em campo, incluindo o acompanhamento de obras de engenharia civil, enquadraram-se todos os reconhecimentos de terreno efetuados, que abarcaram toda a área em estudo, anotando evidências e definindo locais para amostragem de materiais.

Por seu lado a amostragem para confirmação realizou-se tendo como base a cartografia geológica publicada, a fotografia aérea e toda a informação geotécnica entretanto recolhida. A amostragem para confirmação incluiu ainda a observação de afloramentos externos à área em referência, justificados pela necessidade de comparação ou de reconhecimento de características referidas na bibliografia consultada. Como exemplo, pode citar-se o afloramento na barreira de estrada de Ferreira do Alentejo a Beja, cerca de 2 km para além do entroncamento para Cuba (N38° 4,092'W008°2,940'), descrito por Celestino (Celestino Silva *et al.*, 1970), que permitiu a observação e identificação de anortositos que, embora localizados fora da área em estudo, foram ulteriormente comparados com afloramentos em estudo.

Por fim, na amostragem de materiais geológicos, a colheita de amostras indeformadas que representassem a estrutura integral dos solos foi bastante dificultada pelo facto de cerca de 90% da área em estudo se encontrar inserida na Reserva Agrícola Nacional, com utilização agrícola permanente desses solos. Durante o levantamento de terreno identificou-se claramente a pequena espessura dos solos de cobertura e, conseqüentemente, a pequena profundidade a que se encontra, em regra, o substrato rochoso. É possível admitir que, na maioria dos casos, as amostras de solos recolhidas foram obtidas essencialmente entre 0,5 a 3,0 m de profundidade.

Para colheita das amostras indeformadas, recorreu-se ao talhe de blocos, tendo a mesma incidido particularmente sobre os solos argilosos dado que a granulometria grosseira e a descompressão do saprólito não permitiram a colheita deste tipo de amostras, uma vez que não garantiam as suas *características in situ*. As amostras remexidas foram facilmente obtidas para ambos os tipos de materiais. Alguns locais e forma de recolha de amostras dos barros de Beja encontram-se ilustrados nas figuras 3.10 a 3.12.



A – Ponto 20, limite COBA, N37° 59,304'W007°53,587' ;

B – Ponto 22, Variante, N38° 1,058'W007°52,823'

Figura 3.10 – Exemplos de dois locais de recolha de amostras (Barros de Beja)



A – Amostra por talhe; B – Amostra remexida;

ambas no Ponto 23, Ribeira, N38° 1,323'W007°54,275'

Figura 3.11 – Exemplos de recolhas de amostras (Barros de Beja)



A – Talhe de bloco *in situ*, Ponto 22, Variante, N38° 1,058'W007°52,823'

B – Cravação de anel em laboratório

Figura 3.12 – Exemplos da colheita de amostra não alteradas e preparação de provete para ensaio

No que diz respeito à obtenção de amostras de rocha, foram colhidos exemplares representativos do gabro de textura fina, mais comum, tentando-se obter amostras sãs para facilitar a obtenção de provetes de rocha intacta para realização de ensaios laboratoriais; contudo, veio a verificar-se ulteriormente que os blocos exibiam pelo menos dois graus de meteorização diferentes, W_1 e W_2 .

Uma vez que as dimensões dos provetes para realização de alguns ensaios em laboratório, nomeadamente mecânicos, são condicionadas pela textura da rocha, isto é, pela dimensão máxima do grão, que deve ser pelo menos dez vezes inferior ao diâmetro/largura do provete a ensaiar, a própria recolha de blocos de rocha também foi condicionada por esta razão, bem como pelas suas dimensões globais que viabilizassem a facilidade de manuseamento e transporte. Pelo exposto, justificam-se as razões pelas quais a amostragem para rochas se teve de fixar em dois locais específicos. Esses dois pontos foram designados de Canal de adução Pisão- Beja, (ponto 31) N38°02,869', W007°57,785'; e Saibreira, (ponto 32) -N38°01,809', W007°51,947'; figura 3.13.



A – Canal de adução Pisão- Beja (N38°02,869', W007°57,785'),
B – Saibreira (N38°01,809', W007°51,947')

Figura 3.13 – Locais seleccionados para recolha de amostras de rocha

Apesar de colhidas e analisadas várias amostras dos locais de amostragem referidos, apenas 40% daquelas respeitaram os critérios mínimos necessários de dimensão e representatividade, para serem ensaiadas em laboratório.

A figura 3.14 mostra a localização de todos os locais onde se realizou a amostragem de materiais geológicos, referidos no anexo III.

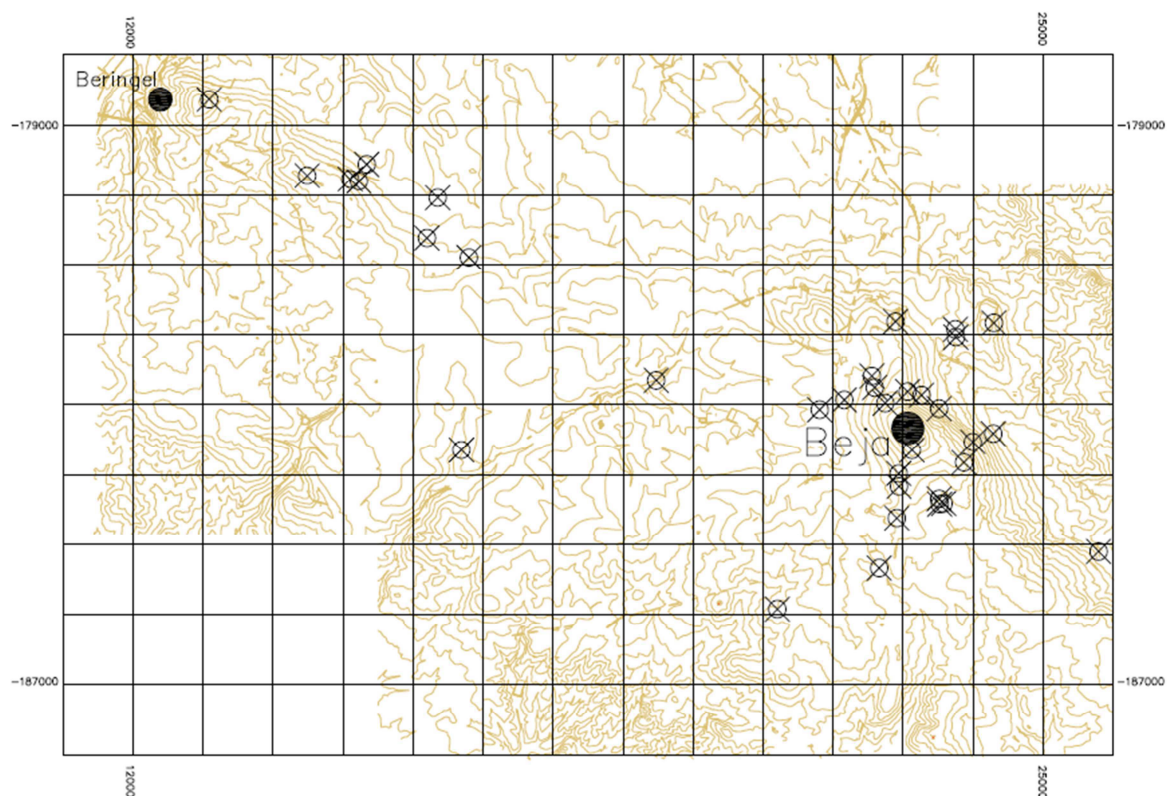


Figura 3.14 – Aspeto geral da distribuição espacial dos pontos de amostragem na área investigada, em base topográfica (equidistância de curvas de nível de 10 metros)

3.2. Caracterização laboratorial

Na realização de ensaios, *in situ* e laboratoriais, os procedimentos adotados revestem-se de fundamental importância na validação e ulterior interpretação dos resultados obtidos. Como referido anteriormente, todos os ensaios da presente Tese em solos foram realizados segundo as normas ou recomendações adotadas em estudos geotécnicos, nomeadamente as normas portuguesas ou especificações do LNEC, bem como as da ASTM; os ensaios em rochas, por seu lado, seguiram as recomendações da ISRM ou as normas da ASTM (Tabela 3.1), dando-se preferência aos procedimentos mais recentes.

Para os solos foram determinadas em laboratório características de identificação e mecânicas, tais como: distribuição granulométrica, limites de consistência - liquidez, plasticidade e de retração linear; teor em água natural, densidade das partículas, teor em matéria orgânica, compressibilidade (ensaio edométrico), expansibilidade e resistência ao corte não drenado (ensaio de corte direto).

Para as rochas foram determinadas as propriedades físicas como teor em água, porosidade e peso volúmico, propriedades dinâmicas como velocidade de ultrassons e propriedades mecânicas como

dureza ao ressalto, ângulo de atrito básico (*tilt test*), compressão pontual, resistência à tração indireta e compressão uniaxial.

Tabela 3.1 – Listagem geral dos ensaios realizados e procedimentos normalizados adotados

<u>Material</u>	<u>Parâmetros / ensaios</u>	<u>Método</u>
Solos	Teor em água (determinação laboratorial)	NP 84 - 1965
	Densidade das partículas (massa volúmica)	NP 83- 1965
	Análise granulométrica, por crivagem e sedimentação	LNEC E-196 -1966
	Limite de liquidez	NP 143 – 1969
	Limite de plasticidade	NP 143 – 1969
	Limite de retração linear	BS 1377 - Parte 2:1990; 6.5
	Ensaio edométrico (consolidação)	ASTM D 2435-04
	Ensaio de resistência ao corte direto	ASTM D 3080 - 04
	Ensaio de expansibilidade	ASTM D 4546 - 08
	Teor em material orgânica	Método de <i>Walkley-Black</i> (Walkley & Black, 1934)
Rochas	Teor em água (determinação laboratorial)	ASTM D 2216 - 05
	Porosidade e peso volúmico	<i>Suggested method for porosity/density determination using saturation and buoyancy techniques</i> , (ISRM, 1977a)
	Velocidade de ultrassons	ASTM D 2845-08
	Dureza ao ressalto	ASTM D 5873-05, <i>Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: revised version</i> (Aydin A. , 2008)
	Ângulo de atrito básico (<i>tilt test</i>)	Suggested technique for determining the basic friction angle of rocks surfaces using core (ISRM, 1981)
	Ensaio de compressão pontual (PLT)	ASTM D 5731-08
	Resistência à tração indireta (RTB)	<i>Suggested method for determining indirect tensile strength by the brazilien test</i> (ISRM, 1978c) / ASTM D 3967-08
	Resistência à compressão uniaxial (RCU) e deformabilidade	<i>Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials</i> (ISRM, 1979)/ ASTM D 7012-07

Foram ainda realizados ensaios de caracterização química, difração e fluorescência de raios X, no Laboratório de Geociências da Universidade de Aveiro (UA) e na Divisão de Geologia Marinha do Instituto Hidrográfico (IH). A realização destes ensaios obedeceu aos procedimentos de execução internos, destas entidades.

As lâminas delgadas para observação microscópica foram executadas pelo Departamento de Geologia, Ambiente e Ordenamento do Território da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) e pelo Laboratório de microscopia do DCT – FCT/UNL.

Todos os ensaios de caracterização física de solos foram realizados no Laboratório de Solos da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG), do Instituto Politécnico de Beja (IPB), com exceção da determinação da matéria orgânica, que se realizou na Escola Superior Agrária (ESA), também do IPB.

Os ensaios realizados em rochas intactas decorreram no Laboratório de Geologia de Engenharia da FCT-UNL, tendo a maioria deles sido desenvolvidos no âmbito de uma dissertação de Mestrado em Engenharia Geológica (Geotecnia) sob orientação da autora. Apenas os ensaios de resistência à compressão uniaxial e a determinação das constantes elásticas (E , ν) foram efetuados numa prensa servo controlada da empresa Betoteste – Estudos de Geotecnia, Lda. (Gomes *et al.*, 2012).

Nas seções seguintes descrevem-se sucintamente os métodos seguidos. No total foram ensaiadas 30 amostras para solos, figura 3.15, e 108 provetes de rocha, figura 3.16, concentrando-se a maioria destes últimos em dois principais pontos de amostragem, como atrás referido. No caso particular das rochas, aquele número de amostras ensaiadas não traduz a totalidade de amostras colhidas, mas a quantidade resultante após a seleção efetuada. Esta seleção incluiu a inspeção visual para agrupamento das amostras com as mesmas características de granulometria e intensidade de meteorização, e as condições dos provetes depois da sua preparação. Após triagem de cada grupo, cerca de 50% das amostras destinou-se a ensaios de identificação e menos de 20% a ensaios mecânicos e dinâmicos. No caso dos solos, ensaiaram-se a totalidade das amostras recolhidas, embora em muitos casos houvesse necessidade de repetição de ensaios ou ajuste de técnicas como no caso do ensaio de expansibilidade, pelo que se ensaiaram mais amostras do que as que correspondem aos resultados apresentados e analisados no capítulo 4.

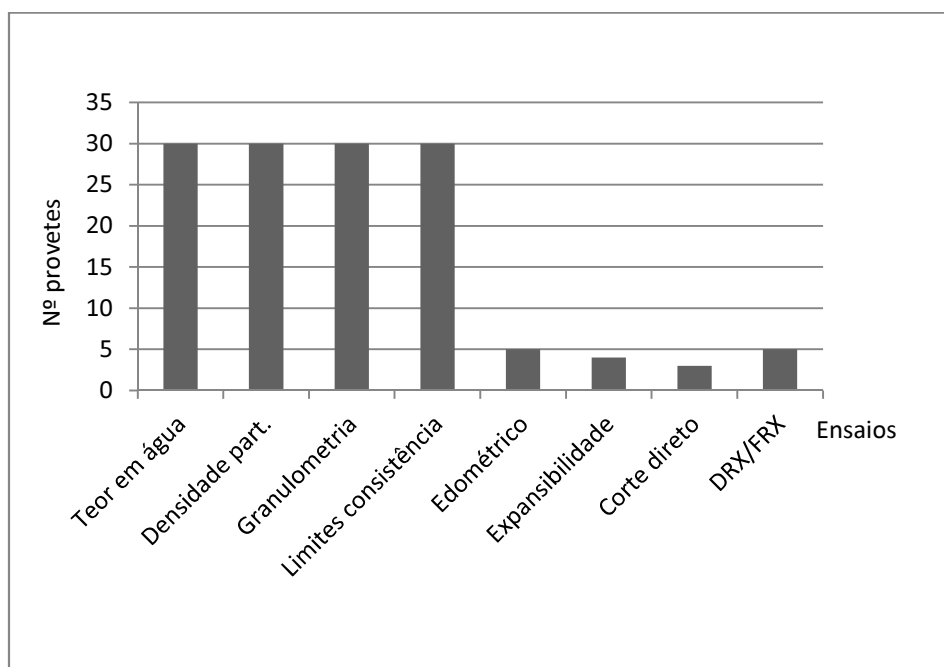


Figura 3.15 – Relação entre o número de amostras ensaiadas e os ensaios realizados em solos

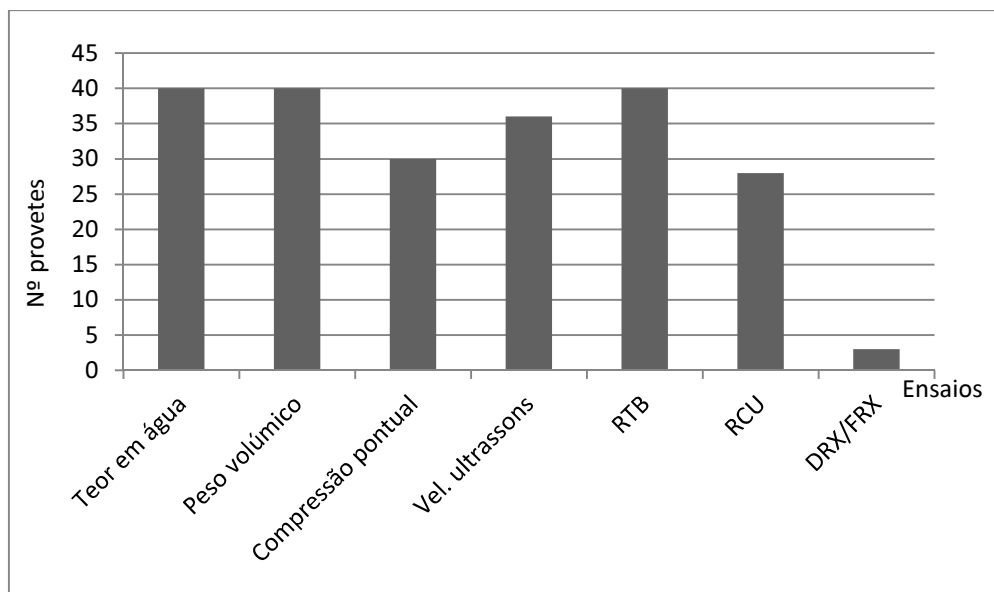


Figura 3.16 – Relação entre o número de provetes ensaiados e os ensaios realizados em rocha (RTB – ensaio de tração Brasileiro; RCU – ensaio de compressão uniaxial)

As amostras de solos enviadas para realização de determinação de matéria orgânica foram exclusivamente de barros de Beja, para esta seleção contribuíram dois critérios: solos que têm utilização agrícola e que, apesar da bibliografia consultada os indicar com baixo teor em matéria orgânica (Carvalho-Cardoso, 1965), careciam de confirmação desses resultados.

3.2.1. Caracterização química e mineralógica

3.2.1.1 Difração de raios X

A DRX é uma técnica que permite, através da análise de uma amostra em pó de rocha ou solo, obter a sua caracterização mineralógica e a semiquantificação dos minerais nela presentes, através da estrutura interna de cada mineral. Como o nome indica, baseia-se no princípio da difração da radiação X no interior, ou seja, na estrutura dos minerais. O modelo de difração é específico de cada mineral, permitindo assim a sua identificação.

Os estudos mineralógicos executados nalgumas amostras dos solos residuais seleccionadas foram realizados sobre a fração fina - granulometria inferior a 0,075 mm (peneiro de malha 200 *mesh*). Para a rocha foi utilizado o pó das amostras depois de moídas

A composição mineralógica foi assim determinada em pó - técnica de difratometria de pós, para os agregados quer não orientados - a fração silte, quer orientados - a fração argila e tipo de filossilicatos.

Procedeu-se à análise da amostra total e posteriormente à análise mineralógica da fração fina, colocando-se cerca de 1 g desta no porta-amostras normalizado de alumínio, de base móvel, do difractómetro de raios X, sem qualquer orientação preferencial.

Os difratogramas obtidos foram interpretados com base nos ficheiros do *Joint Committee for Powder Diffraction Standards* do *International Centre for Diffraction Data*® (ICDD®), que contém dados estruturais retirados de difratogramas de mais de 2000 espécies minerais padrão. Foram ainda utilizadas tabelas disponíveis na bibliografia da especialidade para identificação complementar dos difratogramas (Torre de Assunção & Garrido, 1953).

Os primeiros difratogramas obtidos, dado que não se adequavam à identificação do tipo de argilas presentes por toda a informação estar centrada numa única região de pico, revelaram a necessidade da identificação detalhada dessa fração argilosa. Deste modo, esta fração das amostras de solo foi ulteriormente separada por sedimentação de acordo com a lei de Stokes, utilizando uma solução de hexametáfosfato de sódio a 1% para evitar a floculação. Para a preparação dos agregados orientados foi necessário colocar a suspensão da fração argilosa a secar ao ar, sobre uma placa de vidro.

A difração de raios X foi efetuada com o equipamento Philips PW 3050 (PANalytical, modelo X'Pert PW 3040/60) equipado com ampola de cristal de grafite monocromático para radiação Cu K α . As análises foram executadas entre 2° e 60° 2 θ , no estado de ar seco, depois de uma saturação com glicerol e com tratamento térmico a 500°C. Estes tratamentos permitem diferenciar os minerais argilosos, dadas as diferenças de comportamento que apresentam e que serão refletidas nos difratogramas. O tratamento com glicerol permite evidenciar a presença de esmectite enquanto que o aquecimento evidencia a eventual existência de clorite (Gomes, 2002) e (Gomes, 1988).

Para a semiquantificação dos principais minerais identificados foram calculadas as áreas dos picos das reflexões específicas ponderadas por fatores empiricamente estimados de acordo com (Sultan, 2006), (Sakharov *et al.*, 1999) e (Nadeau, *et al.* 1984). Esta semiquantificação assume particular importância no conhecimento das quantidades de esmectite presente, bem como para a ulterior interpretação dos valores obtidos para os limites de consistência dessas mesmas amostras.

3.2.1.2 Fluorescência de raios X

A FRX é uma técnica que permite, através da análise de uma amostra em pó de rocha ou solo, obter a sua análise química. Como o nome indica recorre também à radiação X mas, desta feita, para excitar os eletrões de cada elemento químico, que libertam ondas com diferentes comprimentos característicos de cada elemento, permitindo a sua identificação.

O equipamento utilizado, Panalytical, espectrómetro Axios, realiza vários varrimentos correspondentes aos pesos ou números atômicos dos átomos. À medida que cada varrimento é efetuado vão sendo apresentados os resultados para esse varrimento, por exemplo um primeiro varrimento apresentará os resultados desde o sódio (Na) ao magnésio (Mg) e um segundo entre o cloro (Cl) e o alumínio (Al) e assim sucessivamente. Os dados são recebidos no recetor do equipamento e comparados com padrões conhecidos, permitindo a identificação dos elementos da amostra. Os equipamentos de FRX disponíveis hoje em dia, permitem analisar todos os elementos químicos com número atômico $Z > 9$, em concentrações entre os 100% e os poucos ppm (Gomes, 1988).

Os estudos geoquímicos por FRX foram realizados tanto sobre a fração fina dos solos residuais, como sobre a respetiva rocha mãe, os gabros, previamente moída. Este pó pode ser fundido, com o auxílio de um fundente adequado, originando discos fundidos, ou pode ser prensado, resultando em pastilhas prensadas, tendo sido esta última a técnica utilizada na preparação das amostras analisadas na presente investigação.

A FRX permite assim determinar os teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 total ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$), CaO, MgO, MnO, K_2O , Na_2O , P_2O_5 , SO_3 e TiO_2 .

A perda por ignição, perda ao rubro ou *lost on ignition* (LOI), foi outro dos procedimentos realizados sobre as amostras em estudo, dado que reflete a perda de água por desidratação ou desidroxilação, a combustão de matéria orgânica ou a evolução de outros voláteis (Gomes, 1988). Esta grandeza suporta uma relação direta entre a evolução de um solo e a presença de água, sendo que é expectável que quanto mais evoluído for o solo residual maior será o seu valor de LOI.

A LOI é expressa em percentagem, e reflete o peso perdido pela amostra durante o ensaio térmico, obtido pela diferença entre o peso da amostra calcinada e o peso inicial da amostra previamente seca (*ibidem*).

3.2.1.3 Análise microscópica

Durante os trabalhos de campo foram recolhidas na área investigada várias amostras de rochas gabróicas e afins, das quais se selecionaram algumas para realização de lâminas delgadas. Os critérios de seleção foram os seguintes:

- a) Amostras de gabros para caraterizar microscopicamente;

- b) Amostras cuja identificação macroscópica era duvidosa ou carecia de confirmação apenas possível em análise microscópica.

No total efetuaram-se cerca de uma vintena de lâminas delgadas, mas a análise microscópica detalhada incidiu sobre pouco mais de metade delas, as que correspondiam às amostras de rocha em que se realizaram os ensaios laboratoriais.

As observações foram realizadas num microscópio Leica DM2500P, de acordo com o recomendado pela (ISRM, 1977) e foram efetuadas com luz linearmente polarizada (NP) e nicóis cruzados (NC), essencialmente nas ampliações 5x e 10x. Registaram-se com a máquina fotográfica incorporada no microscópio, os detalhes considerados mais significativos para a investigação em curso.

A análise macroscópica das rochas foi efetuada no local de amostragem e posteriormente em amostra de mão para identificação de texturas, cor e mineralogia.

3.2.2 Ensaios em solos

A figura 3.17 apresenta, de uma forma genérica, os principais ensaios para a caracterização de solos em função da sua duração. Pretende-se ilustrar, com esta figura, o tempo mínimo que é necessário despende para os ensaios em causa, passando-se posteriormente à sua descrição sumária.

O tempo de duração médio de um ensaio de consolidação é de 2 semanas e meia, do ensaio de expansibilidade é de 72 horas, e apenas o ensaio de corte direto, dadas condições que se adotaram, se realiza em cerca de 20 minutos.

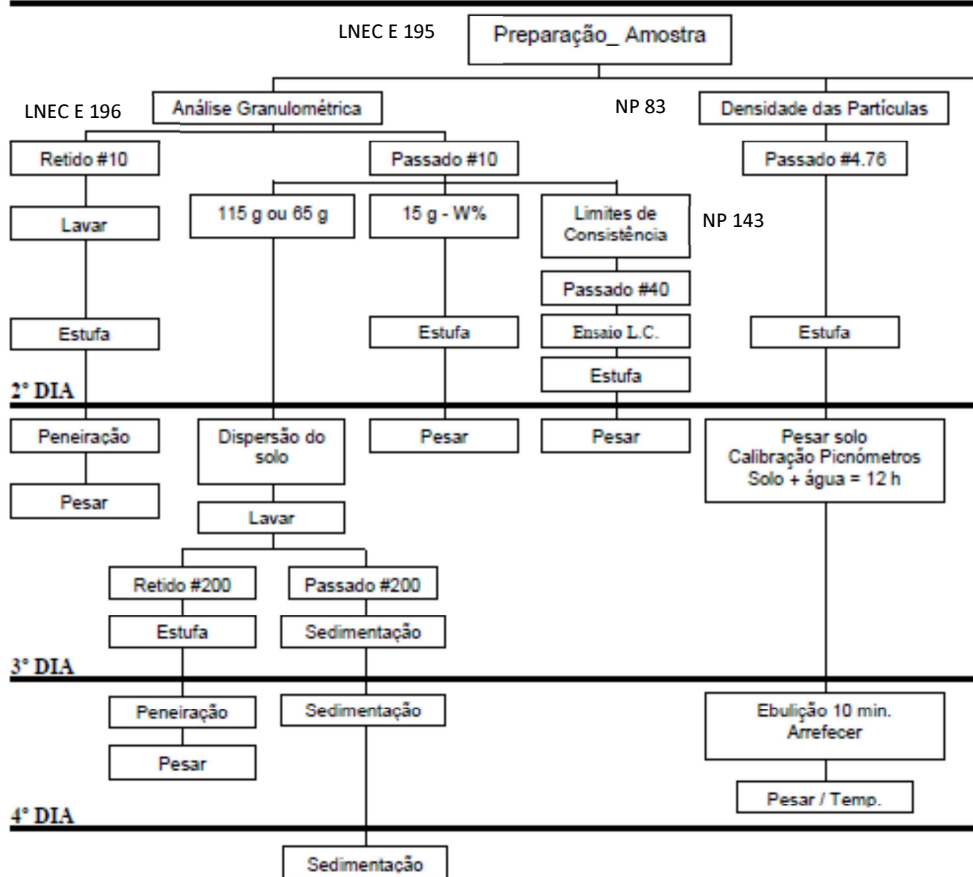
1º DIA

Figura 3.17 – Esquema representativo da duração dos procedimentos de realização dos ensaios de análise granulométrica e densidade das partículas

3.2.2.1 Ensaios de identificação

a) Teor em água

O ensaio pretende determinar o teor em água natural (w_n) de uma amostra de solo de acordo com a NP 83 - 1965. Foi aplicado a todas as amostras colhidas à chegada ao laboratório do ESTIG. O teor em água de um provete de solo traduz-se pelo quociente, em percentagem, da massa de água que se evapora em estufa, a temperatura entre $105^\circ \text{C} \pm 5^\circ \text{C}$, pela massa do provete seco.

A amostra é levada à estufa e após 24h é novamente pesada, ou até massa constante ou seja a diferença entre valores de pesagens em intervalos de 4 h não é superior a 0,1% da massa inicial do provete.

O resultado é calculado da seguinte forma:

$$w = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (3.1)$$

onde M_w – massa da água e M_s – massa das partículas sólidas.

b) Densidade das partículas

A densidade das partículas (G_s) ou densidade relativa foi avaliada de acordo com o método descrito na norma NP 83 – 1965 (NP 83, 1965), e corresponde ao quociente entre a massa de um dado volume de partículas, à temperatura do ensaio, e a mesma massa de igual volume de água, a 20° C.

A toma de amostra depois de passada no peneiro de malha número 4 da ASTM (4,75 mm), é seca em estufa e depois separada em 4 provetes com cerca de 25 g cada. Estes provetes são introduzidos em picnómetros previamente calibrados, que se enchem até $\frac{3}{4}$ da sua capacidade, com água destilada, permanecendo durante aproximadamente 12 h. Findo este período extrai-se o ar remanescente, por ebulição durante 10 min. Deixa-se arrefecer todo o conjunto até à temperatura ambiente, acrescenta-se água destilada até ao traço de referência do picnómetro, pesa-se o conjunto e anota-se a respetiva temperatura.

A determinação da densidade das partículas obtém-se da seguinte equação:

$$G_s = \frac{m_2}{m_1 - (m_3 - m_2)} \quad (3.2)$$

em que m_1 é a massa, em gramas, do picnómetro cheio de água, à temperatura do ensaio; m_2 é a massa em gramas de cada provete, m_3 é a massa, em gramas, do picnómetro com o provete e a água destilada, à temperatura do ensaio e a constante determinada entre o quociente entre a densidade da água à temperatura do ensaio, pela densidade da água a 20° C.

O resultado de G_s é adimensional.

c) Teor em matéria orgânica

Para a determinação da matéria orgânica nos solos utilizou-se o método de oxidação por via húmida, habitualmente conhecido como método de Walkley & Black (Walkley & Black, 1934) (Mylavarapu, 2009), que permite determinar o carbono orgânico total. A decisão de se recorrer a esta metodologia, aplicada à caracterização agrícola, justifica-se pelo facto de os dados disponíveis na bibliografia seguirem o mesmo objetivo e com a disponibilidade do ensaio no laboratório da ESA. O método baseia-se na oxidação em meio ácido da matéria orgânica existente no solo por um excesso

de dicromato de potássio, e na titulação do excesso com sulfato ferroso amoniacal - sal de Mohr. A matéria orgânica calcula-se multiplicando o teor em carbono orgânico total pelo fator 1,724, partindo do pressuposto que a matéria orgânica do solo é constituída por 58% de carbono.

Pesa-se 0,5 g de amostra de solo seco ao ar e coloca-se num frasco de Erlenmeyer de 500 ml. Adiciona-se em seguida 5 ml de solução de dicromato de potássio 1 N e 10 ml de ácido sulfúrico concentrado. Mistura-se a solução, mediante agitação suave, para evitar que o solo adira às paredes do balão e deixa-se em repouso durante 30 minutos. Dilui-se a solução com 100 ml de água destilada, adicionam-se em seguida 5 ml de ácido fosfórico concentrado, 0,1 g de fluoreto de sódio e 1 ml de difenilamina. Titula-se então com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5 N até obter uma cor verde. Prepara-se, paralelamente, um branco exatamente da mesma maneira que fez para a amostra e titula-se, também, com o sal de Mohr, para confirmação de resultados (Walkley & Black, 1934).

A percentagem de carbono orgânico é determinada pela seguinte equação:

$$\frac{(B - V) \times T \times 0,3}{M} \quad (3.3)$$

onde: B - média dos volumes (ml) de sulfato ferroso amoniacal gastos na titulação dos ensaios em branco;

V - média dos volumes (ml) de sulfato ferroso amoniacal gastos na titulação da amostra;

T - título do sulfato ferroso amoniacal (neste caso 0,5 N);

m - massa de amostra de solo (g).

Para o cálculo da matéria orgânica é utilizada a equação:

$$\% \text{ matéria orgânica (g matéria orgânica/100g amostra)} = \% \text{ carbono orgânico} \times 1,72 \quad (3.4)$$

d) Análise granulométrica

A análise granulométrica visa determinar a curva granulométrica do solo, de forma a que seja possível quantificar a distribuição por tamanhos das suas partículas e foi efetuada na ESTIG de acordo com a especificação LNEC E195-1966.



A – bateria de peneiros; B – proveta e densímetro para a sedimentação
 Figura 3.18 – Aspectos dos dispositivos utilizados para a análise granulométrica segundo LNEC E196 – 1966

Separa-se a amostra total, depois de pesada, através do peneiro nº10. O material retido neste peneiro é lavado e vai à estufa a secar. Quando seco, é crivado na coluna de peneiros ASTM (figura 3.18 A) com malha mais larga do que o nº 10. Peneira-se e regista-se a massa retida em cada peneiro, no boletim de ensaio.

Dos materiais passados no peneiro nº 10, frações areia, silte e argilas, vai retirar-se uma toma para realizar o resto da análise granulométrica, cerca de 115g para o caso de solos arenosos e 65g para solos argilosos. Pesa-se e regista-se esse valor no boletim de análise. A toma vai juntar-se a 100 cm³ de solução preparada de antifloculante de acordo com o descrito na especificação – 33 g de hexametáfosfato de sódio e 7 g de carbonato de sódio em 1000 cm³ de água destilada; e esta mistura é depois aquecida durante 10 minutos. Após o aquecimento, a amostra é transferida para um agitador, onde permanece durante 15 min.

Findo aquele tempo, transfere-se a solução para o peneiro nº 200, sobre um tabuleiro, e procede-se à lavagem da amostra com jato de água destilada. Quando a amostra está lavada, isto é a água que passa o peneiro 200 sai límpida, transfere-se a solução do tabuleiro para uma proveta de 1000 ml.

De seguida, agita-se vigorosamente a proveta, obrigando o material depositado no fundo a entrar em suspensão e, terminada esta operação, coloca-se a proveta (figura 3.18 B) em cima da bancada e de imediato se inicia a contagem do tempo para a realização de leituras com o densímetro e da temperatura, aos tempos indicados na especificação, e que se estendem por três dias.

O material retido no peneiro nº 200 vai à estufa a secar a $105^{\circ} \pm 5^{\circ} \text{C}$. Quando seco passará na coluna de peneiros entre o peneiro nº 10 e o nº 200. Pesa-se e regista-se o valor da massa retida em cada peneiro.

Terminadas as operações de peneiração e de sedimentação, obteremos a curva granulométrica do solo em estudo.

e) Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg traduzem o comportamento da fração fina dos solos, na presença da água. No caso particular das argilas, a sua sensibilidade à água manifesta-se por um comportamento rígido, na falta desta e um comportamento plástico, limite de plasticidade (w_p), a líquido, limite de liquidez (w_L), na sua presença.

Para a obtenção dos limites de consistência, seguiu-se no laboratório da ESTIG a NP 143 – 1969, e de acordo com a norma o solo é inicialmente passado no peneiro de malha nº 40 ($420 \mu\text{m}$).

O w_L , determinado através da Concha de Casagrande, marca Controls, modelo 22-T0030/D, traduz o teor em água correspondente ao fecho de um sulco realizado na amostra, colocada na concha normalizada, para um número ideal de 25 pancadas. O valor do teor em água correspondente às 25 pancadas, é obtido por interpolação num gráfico (figura 3.19), onde se encontram projetados os resultados de pelo menos quatro provetes ensaiados com teores crescentes de água, para que o número de pancadas obtido se distribua com dois ensaios situados acima das 25 pancadas e os restantes abaixo delas.

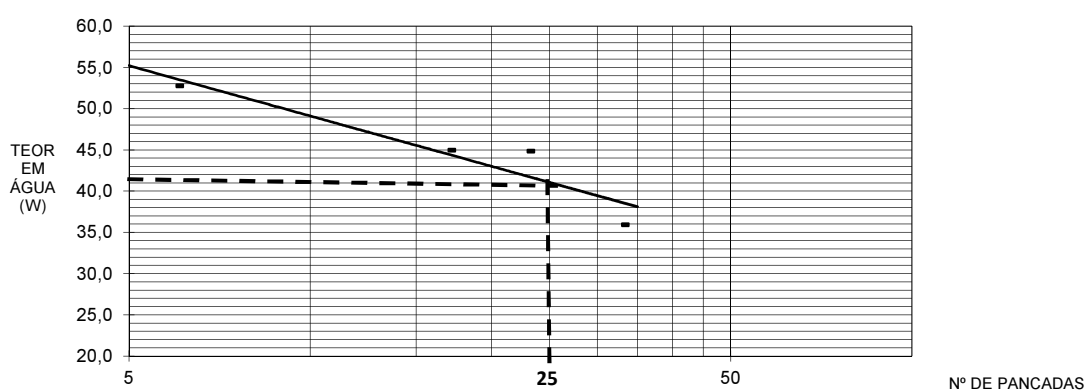


Figura 3.19 – Determinação do valor do limite de liquidez de um solo

O w_p representa o teor em água para o qual um filamento de solo, de dimensões normalizadas, se fissa. O ensaio é realizado em quatro provetes e o limite de plasticidade corresponde à média aritmética dos teores registados.

Com estes valores determinam-se ainda o índice de plasticidade (I_p), índice de consistência (I_c) e o índice de liquidez (I_L), cujas fórmulas se traduzem abaixo.

$$I_p = w_L - w_p \quad (3.5)$$

$$I_c = \frac{w_L - w_n}{I_p} \quad (3.6)$$

$$I_L = \frac{w_n - w_p}{I_p} \quad (3.7)$$

Fator essencial na determinação de limites, em solos argilosos, é o deixar “maturar” o solo com a água inicialmente adicionada. Em solos muito argilosos, depois de o solo ser bem homogeneizado, durante cerca de 20 minutos, deverá “maturar” durante 24 horas antes de se realizarem os ensaios.

f) Limite de retração linear

A retração linear realiza-se numa amostra de solo passado no peneiro nº 40 (425 μ m), e traduz a diminuição de comprimento de uma barra de solo, moldada com o teor em água do limite de liquidez. Nesta investigação adotou-se o método descrito na BS 1377: Parte 2:1990: 6.5 uma vez que a determinação do limite de retração pela NP 143 impõe a utilização de mercúrio, produto altamente contaminante e do qual não se dispunha na quantidade necessária à realização do ensaio.

Depois de colocada a pasta de solo no molde normalizado, deixa-se o molde na posição horizontal a secar ao ar, quando o solo se destacar das paredes do molde, estará pronto a ser transferido para a estufa a uma temperatura de 60-65°C. Quando a retração cessar, aumenta-se a temperatura da estufa para os 105-110°C para completar a secagem. Desta forma a secagem da amostra ocorre de forma progressiva, minimizando a fissuração da amostra.

Deixa-se o molde com o solo arrefecer, e realiza-se a medição do comprimento da barra de solo com um paquímetro ou régua metálica, efetuam-se 3 medições e toma-se a sua média (L_D). A figura 3.20 regista a posição do provete no início e no fim do ensaio.

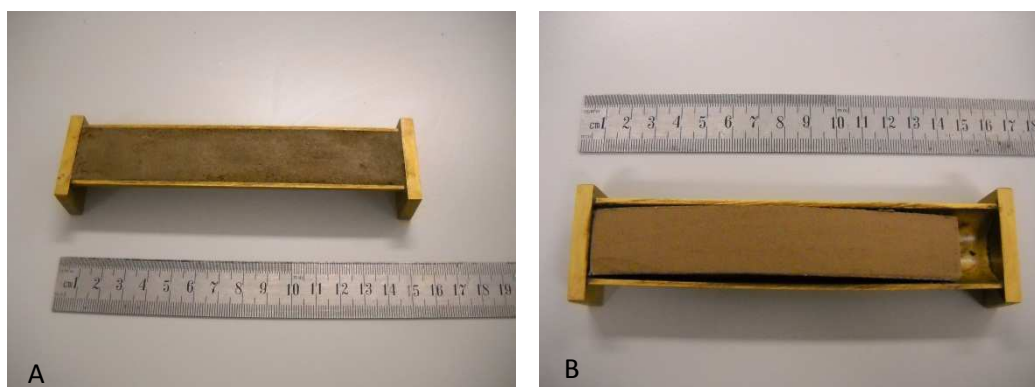
O cálculo da retração linear (L_s) é obtido pela expressão:

$$L_s = \left(1 - \frac{L_D}{L_0}\right) \times 100 \% \quad (3.8)$$

em que L_0 – Comprimento inicial (comprimento do molde que será 140mm); e L_D – Comprimento do provete seco.

Para alguns solos o I_p pode ser proporcional ao L_s . Isto pode ser útil no caso dos solos siltosos para os quais o limite de plasticidade é difícil de determinar. Neste caso pode utilizar-se a correlação (Hazelton & Murphy, 2007):

$$I_p = 2,5 \times L_s \quad (3.9)$$



A – provete no início do ensaio; B – provete no fim do ensaio

Figura 3.20 – Ensaio de retração linear

Por este não ser um ensaio recorrente na caracterização de solos apresentam-se valores de referência para L_s na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Classificação dos solos quanto à sua categoria e potencial de expansibilidade a partir dos valores da retração linear (Hazelton & Murphy, 2007)

Categoria	Retração linear (%)	Potencial de expansibilidade
Baixo	0-12	Não crítico
Médio	12-17	Marginal
Elevado	17-22	Crítico
Muito elevado	>22	Muito crítico

3.2.2.2 Ensaios de caracterização mecânica e de compressibilidade

a) Ensaio edométrico

O ensaio edométrico ou ensaio de consolidação realizado de acordo com a norma ASTM D 2435-04 pretende determinar a velocidade de consolidação e o assentamento de um solo em situação de confinamento lateral e drenagem axial, quando sujeito a incrementos de carga controlados.

Para os ensaios realizados seguiu-se a metodologia A da citada norma, que indica que o carregamento da amostra, em escalões de carga múltiplos entre si, seja prolongado por um período de 24 horas. Os ensaios foram realizados num equipamento ETI, Proeti S.A., modelo ETI-44.0150 (figura 3.22).

Para o ensaio edométrico foram utilizadas amostras dos designados “Barros de Beja”, com o teor em água natural, nas quais era cravado o anel edométrico, com 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura. O provete era em seguida pesado e colocado na célula, com placas porosas no topo e na base, previamente fervidas para estarem livres de ar, de forma a permitir a drenagem.

No caso de amostras com fração argilosa relevante e que possam ter tendência para a expansibilidade, como no caso em referência, foi necessário realizar vários ensaios até se conseguir obter a carga máxima que ainda permitia a expansão. Embora esta metodologia tenha levado ao desperdício de vários provetes, permitiu determinar que as amostras em estudo só deixavam de expandir quando submetidas a uma tensão de 5 kPa. Optou-se assim por não iniciar o ensaio com carga zero, mas aplicando uma carga de 100 g, correspondente à tensão de 5 kPa, a fim de evitar a expansibilidade da amostra. Procedeu-se em seguida a um ciclo de carregamentos até aos 32 kg e, então, iniciava-se a descarga, em intervalos alternados, de 8 kg, 2 kg, 0,5 kg, até à descarga total.

Seguindo as recomendações da norma, foram realizadas, pelo menos três leituras a tempo/deformação, entre os escalões 4 kg, 8 kg, 16 kg e quando possível a 32 kg.

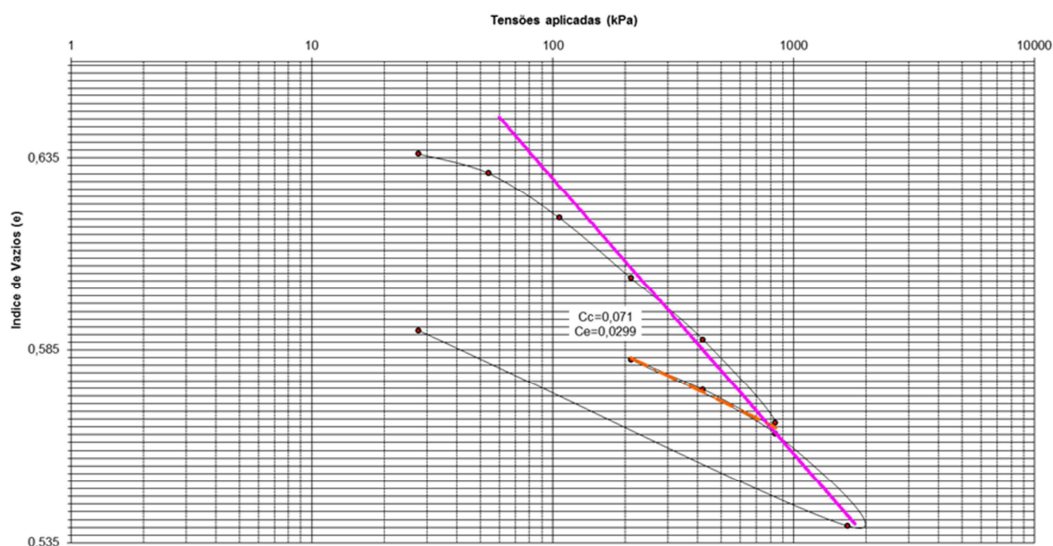


Figura 3.21 – Parâmetros definidores da compressibilidade do solo no diagrama $\log \sigma'-e$

O ensaio permite ainda obter os valores dos coeficientes de consolidação e de compressibilidade. Podem ainda obter-se os valores dos índices de compressibilidade e recompressibilidade, índice de vazios e permeabilidade.

A partir do gráfico representado na figura 3.21 pode determinar-se o índice de compressibilidade do solo, C_c , que corresponde ao declive do ramo virgem da curva $\log \sigma'-e$, e o índice de recompressibilidade, que representa o declive do ramo de descompressão do diagrama.

Quando a representação gráfica se traduz na curva $\sigma'-e$ a grandeza que, a cada ponto da curva mede, em módulo, a variação do índice de vazios por unidade de acréscimo de tensão efetiva, designa-se por coeficiente de compressibilidade, a_v (Fernandes, 2006).

Pode também determinar-se a deformação volumétrica através do coeficiente de compressibilidade, m_v . O valor inverso deste coeficiente representa o módulo de deformabilidade do solo para condições em que as extensões horizontais são nulas, significando este parâmetro o módulo edométrico do solo, E_{eod} (*ibidem*).

$$m_v = \frac{1}{1+e_0} a_v \quad (3.10)$$

$$E_{eod} = \frac{1}{m_v} \quad (3.11)$$



A - célula edométrica, anel diâmetro aproximado de 5cm; B - aspeto geral
Figura 3.22 – Equipamento utilizado no ensaio edométrico

b) Ensaio de corte direto

A norma ASTM D 3080-04 estabelece a metodologia para a realização do ensaio de corte direto em solos arenosos, em condições drenadas e consolidadas. No caso da presente investigação, quer o tipo de solos ensaiado – barros de Beja, quer as condições de realização do ensaio, consolidação,

drenagem e velocidade de deslocamento, não foram as descritas naquela norma. Tentando exprimir as condições mais desfavoráveis para os solos argilosos, a curto prazo, estipulou-se a realização do ensaio em condições não consolidadas, não drenadas, com velocidade de corte de 0,8 mm/minuto, com esquema de cargas de 2 kg, 4 kg e 8 kg. De resto, seguiram-se as indicações genéricas da ASTM D 3080-04.

O objetivo do ensaio é a determinação dos parâmetros de corte, particularmente importantes na definição dos ângulos de estabilidade de taludes, que podem por exemplo estar associados a escavações. À semelhança do ensaio edométrico, a partir da amostra indeformada talha-se o provete, que é inserido num molde a partir do qual é transferido para a caixa de corte; ali, sob a ação de uma tensão vertical de confinamento, é submetida a um deslocamento lateral, a velocidade constante e controlada, sendo obrigada a romper pelo plano de corte imposto pelo equipamento. Normalmente são ensaiadas três ou mais provetes, sob a ação de diferentes cargas verticais, de forma a permitir a construção do gráfico da envolvente de Mohr, que permitirá determinar os parâmetros de corte (figura 3.23).

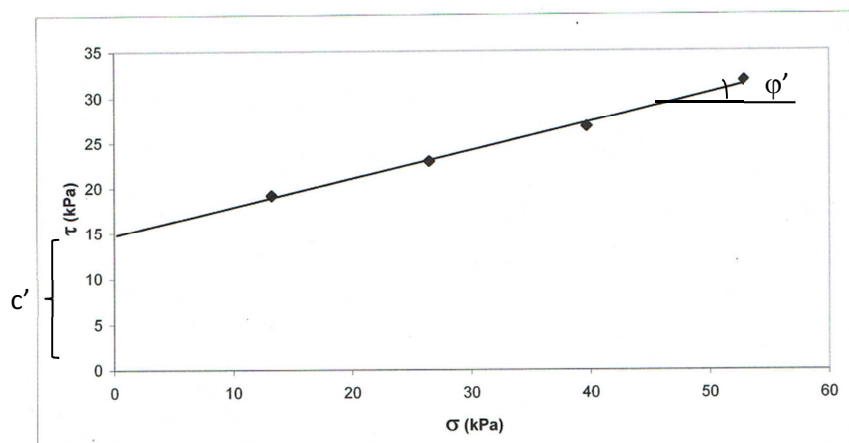
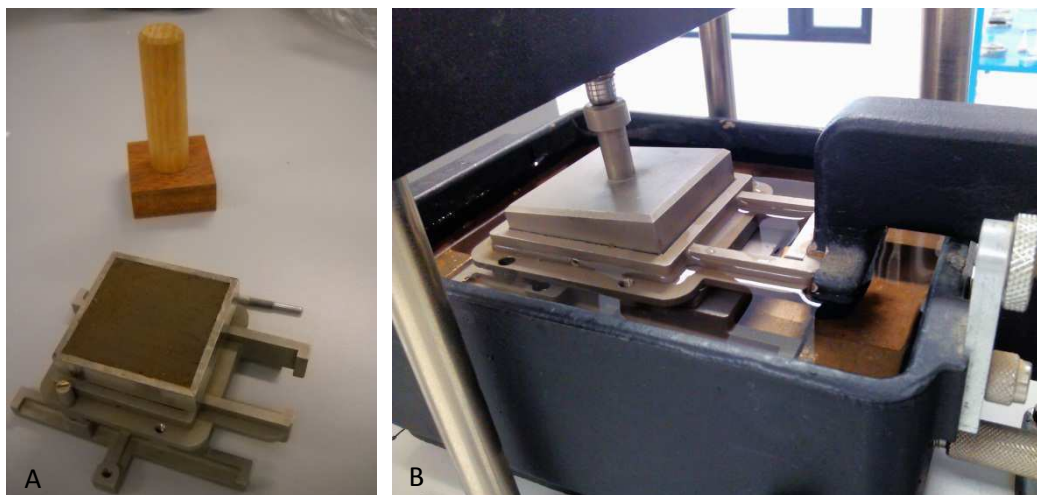


Figura 3.23 – Determinação dos parâmetros de resistência a partir dos resultados do ensaio de corte direto



A – montagem do provete na caixa de corte de 36cm² área, adequada a solos argilosos; B – aspeto no final do ensaio

Figura 3.24 – Ensaio de corte direto

Os valores obtidos para este ensaio são a coesão efetiva (c') e o ângulo de atrito (ϕ'), enunciados na equação 3.12.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (3.12)$$

O ensaio foi realizado num equipamento marca ELE, modelo 26-2112 (figura 3.24B), com caixa de corte quadrada de 6cm de lado por 2cm de altura. Os registos das leituras dos três defletómetros, de deslocamento vertical, de deslocamento horizontal e do anel dinamométrico, bem como do cronómetro, foram obtidos em intervalos de 10 segundos até ao primeiro minuto e daí em diante de 30 em 30 segundos. Os ensaios não consolidados não drenados são ensaios rápidos em que uma amostra é ensaiada em cerca de 15 minutos, não havendo portanto tempo para dissipação das tensões na amostra (Smith, 2006).

A caixa de corte disponível, quadrada com dimensões de lado de 60 mm, não se adequa a granulometrias mais grosseiras como as que representam os solos do saprólito, razão que, associada às dificuldades de amostragem, justifica não se terem realizado ensaios de corte direto nestes solos e apenas se terem realizado em solos finos.

c) Ensaio de expansibilidade

A realização do ensaio de expansibilidade teve como finalidade responder a dois objetivos principais: conhecer o comportamento dos designados barros de Beja em situação de saturação e para carregamentos baixos, que se sabem solos argilosos e se verificou em campo a sua retração pela presença de fendas de dessecação, e obter o valor da carga vertical máxima a aplicar no ensaio de

consolidação a fim de controlar a expansão inicial da amostra. Aliás, utilizou-se exatamente o equipamento de consolidação já referido, ETI, Proeti S.A., modelo ETI-44.0150, para a realização dos ensaios de expansibilidade.

Consultaram-se e compararam-se normas nacionais (LNEC E200-1967) e internacionais (UNE 103 601, 1996) de forma a obter o procedimento e plano de cargas mais adequados. As maiores dificuldades estiveram relacionadas com a definição do plano de cargas a aplicar pois a maioria das normas sugerem tensões verticais para as quais se sabia não ocorrer expansibilidade, de acordo com os dados obtidos através do ensaio edométrico. A norma adotada, ASTM D 4546-08, método A, necessita de 4 provetes e sugere tensões de, respetivamente 1 kPa, 20 kPa, 50kPa e 100kPa. Estas tensões sugeridas não se equiparam também aos escalões de tensões aplicadas no ensaio de consolidação (ASTM D 2435-04).

Assim, decidiu-se ensaiar quatro provetes sujeitos a massas de zero, 50g, 100g e 200g, respetivamente, correspondendo a tensões aproximadas de 0kPa; 2,5kPa; 5kPa e 10kPa. Verificou-se que para a maioria dos ensaios experimentados com massas de 250g, tensão 12,42KPa, já ocorre carregamento da amostra.

O procedimento geral define que se crave a amostra no anel com um disco acrílico, que é posteriormente retirado, de forma a possibilitar a expansão confinada da amostra (Head, 1982). Pesa - se a amostra no anel e monta-se o conjunto na célula e posteriormente no equipamento edométrico. Os carregamentos da amostra devem ser realizados em incrementos entre 5 a 10 minutos de intervalo, com o total de tempo de carga não excedendo 1 hora para evitar secar as amostras. Regista-se o valor desta primeira leitura (Δh_1) com o carregamento correspondente e só de seguida se submerge a amostra. As leituras são realizadas a tempos: 0,5 min; 1 min; 2 min; 4 min; 8 min; 15 min; 30 min; 1h; 2h; 4h; 8h; 24h até às 72h (3 dias). No final do ensaio determina-se o peso seco da amostra.

3.2.3 Ensaios em rocha intacta

3.2.3.1 Ensaios de caracterização física

a) Teor em água natural

A necessidade de determinação do teor em água nas amostras de rocha a ensaiar para RCU e RTB, decorre de imposições das normas ASTM e recomendações da ISRM, que indicam que este valor deverá ser determinado imediatamente após a realização do ensaio, para que seja possível avaliar as condições do material nesse momento.

O procedimento base de determinação do teor em água para rochas é em tudo idêntico ao mesmo ensaio já descrito para os solos. Para a determinação do teor em água de amostras de rocha apenas se procedeu à alteração da temperatura, tendo esta sido reduzida para os $60^{\circ} \text{ C} \pm 5^{\circ}$, para que não ocorressem alterações a nível mineralógico que pudessem influenciar a retenção de água nos poros.

b) Porosidade efetiva e massa volúmica

A porosidade pode fazer variar as características da rocha, nomeadamente contribuir para diminuir a sua resistência e aumentar a deformabilidade. Para uma adequada caracterização das amostras a ensaiar, por exemplo para RCU, necessitam de ser determinados os valores da porosidade e massa e peso volúmico das amostras.

Seguiram-se as recomendações da ISRM (ISRM, 1977a) em amostras de geometria regular. O ensaio prevê a saturação por imersão, em água sob vácuo, de um provete de rocha de massa superior a 50 g, por um período de pelo menos uma hora. O provete é pesado imerso, posteriormente seco em estufa a $60^{\circ} \text{ C} \pm 5^{\circ}$, e novamente pesado.

A diferença de massa entre as duas pesagens permitem determinar a massa volúmica, peso volúmico e a porosidade da rocha, da forma indicada a seguir.

$$\rho_a = \frac{m_d}{m_{sat} - m_{sub}} * \rho_w \quad (3.13)$$

onde, ρ_a – massa volúmica aparente (g/cm^3);

m_d – massa do provete seco (g);

m_{sat} – massa do provete saturado (g);

m_{sub} – massa do provete submerso, pesagem hidrostática (g);

ρ_w – massa volúmica da água ($0,998 \text{ g/cm}^3$).

Para a determinação da porosidade vem:

$$p_0 = \frac{m_{sat} - m_d}{m_{sat} - m_{sub}} * 100 \quad (3.14)$$

onde, p_0 – porosidade aberta (%).

Para a obtenção do peso volúmico, γ , necessitamos apenas de multiplicar a massa volúmica aparente, ρ_a , pela aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}$).

3.2.3.2 Ensaios dinâmicos

a) Velocidade de ultrassons

A avaliação laboratorial de acordo com a ASTM D 2845-08 da propagação das ondas elásticas, longitudinais e transversais, V_p e V_s , permitem a determinação das constantes elásticas dinâmicas - módulo de elasticidade, E , e coeficiente de Poisson, ν .

$$E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (3.15)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - V_s^2} \quad (3.16)$$

Onde: E – módulo de elasticidade ou de Young (Pa);

V_s – velocidade de propagação das ondas S (m/s);

V_p - velocidade de propagação das ondas P (m/s);

ρ – massa volúmica (Mg/m^3);

ν – coeficiente de Poisson.

O ensaio foi realizado segundo a norma americana ASTM D 2845-08, num equipamento PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indication Tester*), da C.N.S. Electronica, com transdutores de 54 kHz e 5cm de diâmetro para a medição das ondas longitudinais, e transdutores de igual frequência mas de 1,75 cm de diâmetro, para a determinação das velocidades transversais.

O ensaio foi executado em provetes cilíndricos de rocha, aos quais se ligaram, nas suas extremidades, os transdutores, permitindo a propagação na horizontal das ondas, longitudinais e transversais, e o consequente registo dos seus tempos de chegada. A norma determina uma dimensão mínima lateral para o provete, de pelo menos 5 vezes o comprimento de onda, de forma a que esteja a ser medida a velocidade real, e estabelece ainda que o comprimento de onda deve ser três vezes o tamanho médio do grão da amostra.

3.2.3.3 Ensaios de caracterização mecânica

a) Determinação do ângulo de atrito básico das discontinuidades

Os modelos para análise de fraturas desenvolvidos ao longo dos anos têm quase sempre como base o critério de rotura de Barton (Barton & Choubey, 1977) que determina, com precisão aceitável, a

resistência ao corte de pico nas superfícies rochosas. O ângulo de atrito básico das discontinuidades (ϕ) foi descrito por Barton (*ibidem*) como o valor do $\arctg(\tau/\sigma_n)$. Esta determinação baseia-se em ensaios de resistência ao corte residual em superfícies planas, serradas e tratadas com jacto de areia.

Stimpson (ISRM, 1981) sugere a determinação do ângulo de atrito básico das discontinuidades através de um ensaio simples, recorrendo a uma mesa basculante e utilizando tarolos de sondagem, assumindo que estes também apresentam superfícies pré cortadas e lisas.

São necessários para o ensaio três provetes cilíndricos (carotes) da mesma amostra que se assentam em pirâmide (figura 3.25) sobre uma base que terá de ser basculada lentamente com uma precisão de $\pm 5^\circ$ na leitura do ângulo correspondente ao ponto de deslizamento. Os provetes inferiores, B e C, são impedidos de escorregar e a base vai basculando até que ocorra o deslizamento do provete superior. Regista-se o ângulo α , formado entre a base basculante e a horizontal, na altura do deslizamento do provete superior. O ângulo de atrito básico ϕ é determinado pela equação 3.17.

$$\phi = \arctg(1,155 \operatorname{tg} \alpha) \quad (3.17)$$

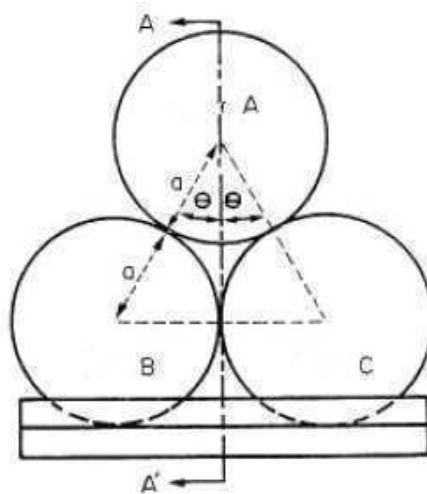


Figura 3.25 – Posição dos três provetes A, B e C na base da mesa basculante (ISRM, 1981)

O equipamento utilizado para os ensaios realizados nesta investigação foi desenvolvido no laboratório de geologia de engenharia, do departamento de Ciências da Terra, da FCT-UNL (figura 3.26).

A facilidade de realização deste ensaio e a importância da obtenção do ângulo de atrito básico das discontinuidades, nomeadamente para cálculos de estabilidade de taludes, contribuem para a sua

utilidade, tendo levado alguns investigadores (Xian-Qin & Cruden, 1992) a desenvolver um equipamento portátil para realização de ensaios no campo, sempre que a coesão das amostras dificulta o seu transporte para o laboratório.



Figura 3.26 – Posição de três provetes de gabro na base da mesa basculante, durante um ensaio (foto cedida pelo Doutor Pedro Lamas)

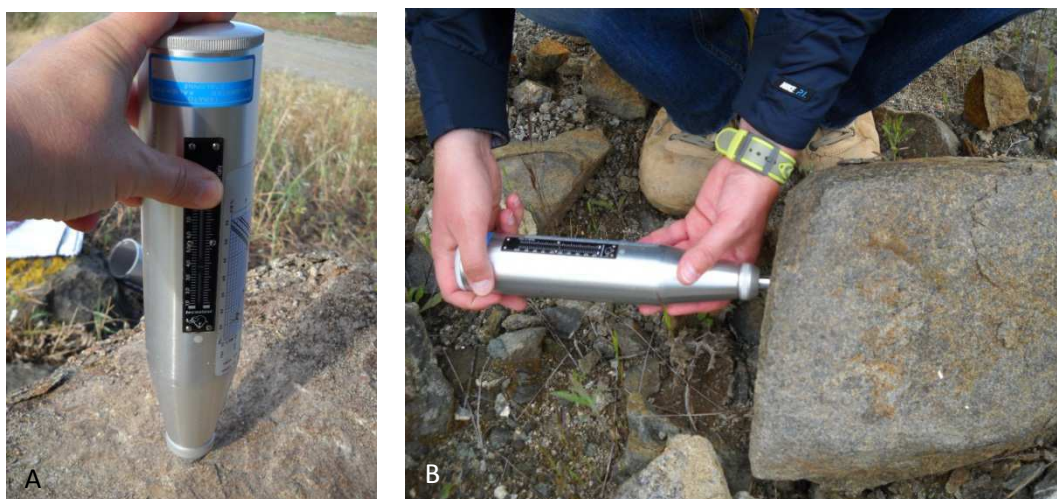
b) Dureza ao ressalto

O esclerómetro ou martelo de Schmidt é um instrumento de uso simples e portátil, que classifica a dureza ao ressalto, R_L , e que nos pode fornecer valores indicadores da resistência à compressão, embora essa conversão deva ser realizada com precaução e adequada a cada tipo de rocha.

Os ensaios foram realizados com um equipamento de marca Tecnotest, modelo AT 241/E (equipamento do tipo L, energia de impacto de 0,74 Nm).

O equipamento é previamente calibrado e o ensaio realizado para que seja libertado o espigão do martelo, com a energia que lhe é correspondente, sendo lido na sua escala lateral o valor obtido para esse ressalto.

As medições foram todas realizadas com o martelo a 90° da face a ensaiar, como se pode observar pelas figuras, com direção horizontal ou vertical dependendo da exposição da face. Em cada face foram projetadas malhas que garantiram a realização de pelo menos 20 ensaios, espaçados, no mínimo, o diâmetro do espigão (figura 3.27).



A – na posição vertical, B – na posição horizontal
 Figura 3.27 – Realização do ensaio de dureza ao ressalto em blocos *in situ*

Os blocos de rocha foram ensaiados em laboratório e no campo, respeitando as condições de que as amostras deveriam apresentar-se homogéneas, intactas e com superfícies planas e lisas.

c) Ensaio de compressão pontual

O ensaio de compressão pontual foi inicialmente definido pela ISRM (ISRM, 1985) sendo a norma mais recente publicada pela ASTM (ASTM D 5731, 2008). O princípio do ensaio é a compressão de uma amostra de rocha entre 2 ponteiros cónicas opostas. O ensaio pode ser realizado em provetes cilíndricos, ensaiados na diametral ou no sentido axial, em blocos ou em amostras irregulares. No caso em estudo o ensaio foi realizado em amostras irregulares cumprindo os requisitos impostos pela norma às suas dimensões, num equipamento de marca Controls, modelo 45-D0550/D (figura 3.28A).

A carga de rotura e as dimensões das amostras, comprimento, largura e altura, vão determinar o índice de carga pontual, valor este muitas vezes usado para estimar a resistência à compressão uniaxial, razão principal pela qual se realizou este ensaio, uma vez que o ensaio de compressão pontual é mais fácil, rápido e económico na sua execução.

Para cada determinação do índice de carga pontual, I_s , são ensaiados 12 provetes com as mesmas características, e todos devem obter rotura válida (figura 3.28B). Para obtenção dos resultados é necessário efetuar a correção de diâmetro de forma a que, a partir dos valores obtidos para amostras irregulares se possam transformar em valores de provetes cilíndricos de 50 mm de diâmetro, $I_{s(50)}$, para os quais o ensaio se encontra calibrado. O resultado final é obtido pela média

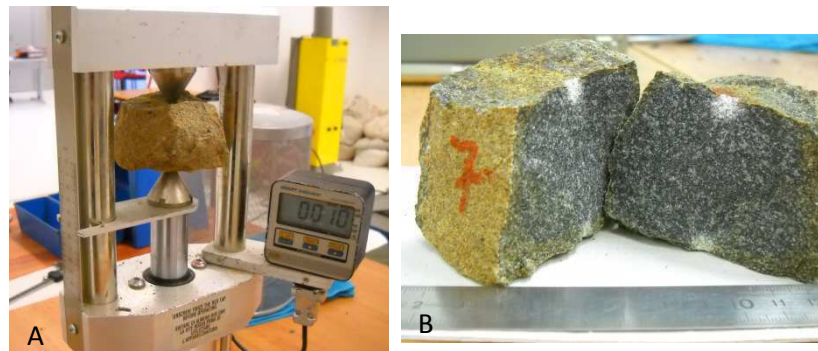
aritmética de todos os valores obtidos, depois de retirados os dois valores mais altos e os dois valores mais baixos.

$$I_s = \frac{P \cdot 1000}{De^2} \quad (3.18)$$

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (3.19)$$

$$F = (De/50)^{0,45} \quad (3.20)$$

Onde P é a carga aplicada, em kN, e De representa o diâmetro equivalente da amostra, em mm.



(A) aspeto geral do dispositivo; (B) amostra de gabro após ensaio com rotura válida

Figura 3.28 – Equipamento de resistência à compressão pontual

d) Resistência à tração indireta

A resistência à tração direta pode ser determinada mas os procedimentos necessários à realização deste ensaio são complicados e a montagem dos provetes difícil de executar, para a maioria das rochas. Os métodos de determinação indireta da resistência à tração apresentam uma execução mais simples e, segundo a ISRM (ISRM, 1977a), simulam de forma mais aproximada as reais condições de terreno. Na realidade a maior parte das rochas rompem à tração quando sujeitas a campos de tensões biaxiais, onde uma tensão é de tração mas a outra tensão é compressiva, com uma magnitude que não excede o triplo da tração.

No caso da determinação indireta da resistência à tração, e no caso particular do ensaio Brasileiro, as amostras têm forma circular, superfícies perfeitamente paralelas, com diâmetros de cerca de 50 mm e espessuras próximas do seu raio (ASTM D 3967-08). O provete é colocado no suporte definido para o ensaio Brasileiro, e submetido a uma carga compressiva axial, aplicada continuamente e por forma a que a rotura ocorra entre 1 a 10 minutos, correspondendo a velocidades de carga situadas entre os 0,05 e 0,35 MPa/s.

A resistência à tração indireta é calculada pela expressão:

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.21)$$

em que: P - Carga aplicada (kN);

L – Espessura do provete (mm);

D – Diâmetro do provete (mm).

Pelo menos 10 amostras devem ser ensaiadas para se obter uma média representativa.

e) Resistência à compressão e deformabilidade não confinadas

Este ensaio determina a resistência à compressão uniaxial (RCU) de uma amostra de rocha, não confinada, e permite ainda a determinação das suas constantes elásticas, o módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson (ν).

Os ensaios foram conduzidos seguindo as recomendações da ISRM (ISRM, 1977a) e da norma ASTM D 7012-07 e foram realizados num equipamento servo-controlado, com centragem de provetes, C109M CYBER-PLUS Evolution da Matest, pertencente à empresa Betoteste – Estudos de Geotecnia, Lda. As amostras são cilíndricas, de topos paralelos e relação altura-diâmetro entre 2,5-3,0. O diâmetro deve ser proporcional ao tamanho dos maiores grãos da amostra, numa razão de 10:1, mas nunca deverá ser inferior a 54 mm.

O provete é carregado entre dois pratos de uma prensa, a velocidade constante, de forma a que a rotura ocorra entre 5 a 10 min, desde o início do ensaio, ou seja entre 0,5 – 1,0 MPa/s. No sentido de se determinarem o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, foram colados extensómetros axiais e radiais em todos os provetes. Após um primeiro ciclo de carga-descarga, a amostra foi carregada até ser atingida a rotura.

Para cada tipo de rocha a caracterizar foram realizados pelo menos 7 ensaios, desprezando-se posteriormente os 2 valores extremos.

Durante o ensaio registam-se as curvas de tensão - deformação axial e as respetivas deformações laterais, que permitem o cálculo do módulo de Young e do coeficiente de Poisson.

O módulo de Young foi obtido seguindo a metodologia:

- a) Módulo de elasticidade tangente obtido através de uma reta tangente, para uma percentagem de 50% da tensão máxima, no ramo elástico da curva $\sigma_u - \epsilon_a$ (figura 3.29a);

- b) Módulo de elasticidade médio, determinado a partir dos intervalos médios do ramo elástico da curva $\sigma_u - \epsilon_a$, ou seja na parte reta da curva tensão-deformação (figura 3.29b);
- c) Módulo de elasticidade secante obtido no intervalo que vai desde a origem até 50% do valor da resistência (figura 3.29c).

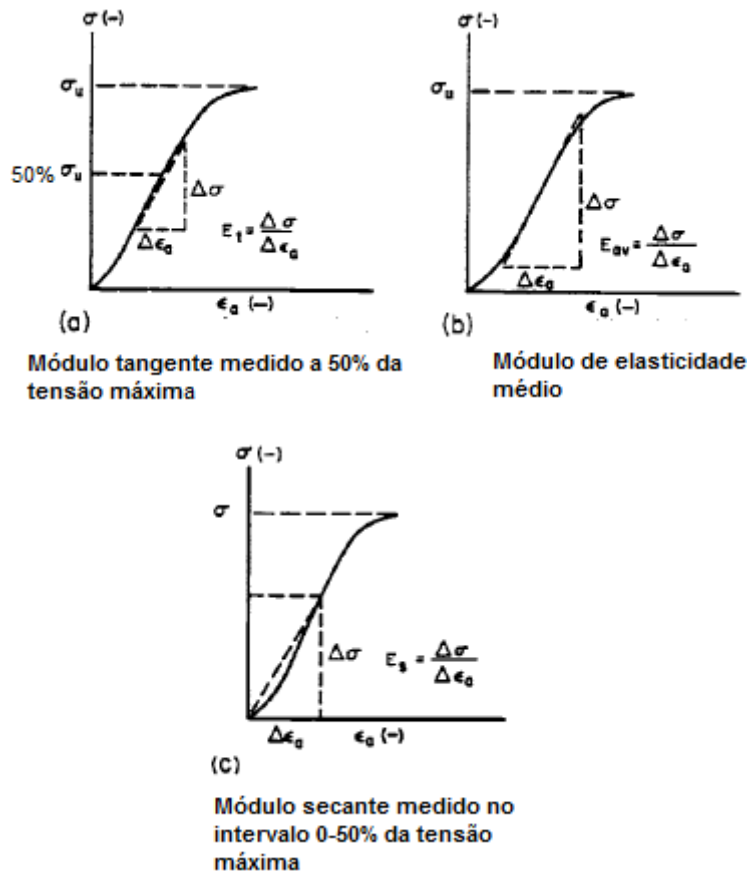


Figura 3.29 – Determinação gráfica dos módulos de elasticidade, adaptado de ASTM D 7012-07

O coeficiente de Poisson é determinado da seguinte forma:

$$\nu = - \frac{\text{Módulo de Young}}{\text{Inclinação da curva de deformação lateral}} \quad (3.22)$$

A figura 3.30 representa a curva tensão deformação obtida no ensaio, onde se assinalam a deformação lateral e axial.

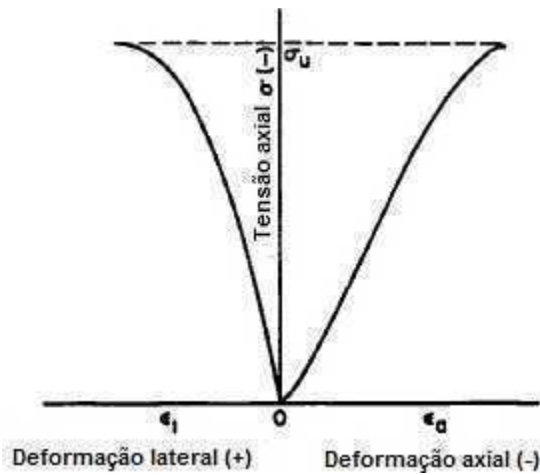
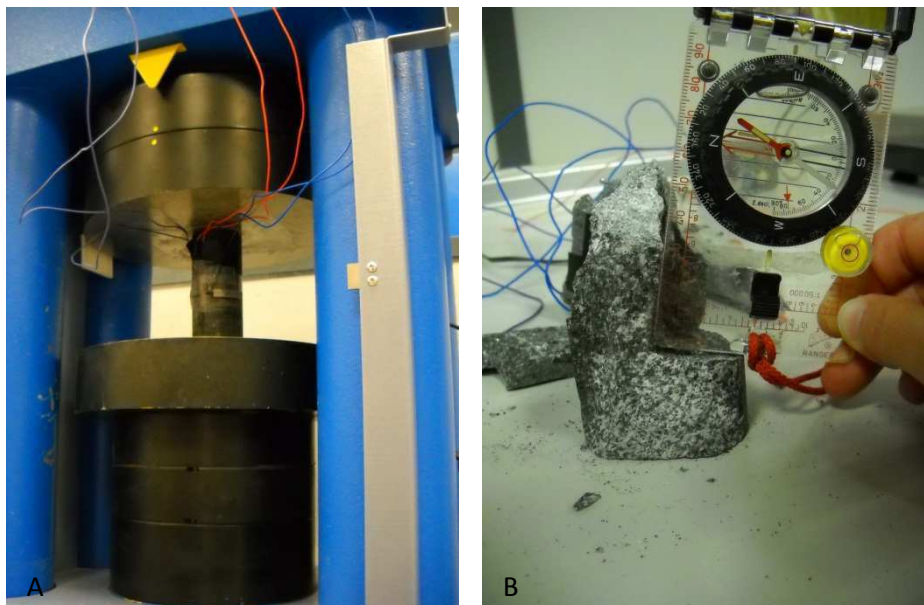


Figura 3.30 – Curva tensão – deformação, obtida no ensaio de RCU, adaptado de ASTM D 7012-07

A figura 3.31 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio (A) e o aspecto de um provete depois de ensaiado onde se realizou a determinação expedita do ângulo de resistência ao corte do material rochoso (B). Sempre que a rotura do provete permite é possível registar o ângulo de inclinação das superfícies de rotura (β), fornecendo desta forma uma aproximação ao valor do ângulo de atrito interno ou de resistência ao corte (φ), de acordo com o critério de Mohr-Coulomb, uma vez que o ensaio não foi realizado com tensão confinante.



(A) provete pronto para ensaio, onde são visíveis os extensómetros laterais; (B) provete depois de ensaiado com medição do ângulo da superfície de fracturação

Figura 3.31 – Provete com cerca de 138 mm de altura aproximada colocado na prensa cervo-controlada

Capítulo 4- Resultados obtidos e sua discussão

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos, quer dos perfis inventariados no terreno quer da caracterização desenvolvida nos gabros e nos solos deles derivados. Os gabros apresentam no seu perfil de meteorização o saprólito, solos pardos, pouco evoluídos e de granulometria grosseira, e solos residuais mais evoluídos, negros e predominantemente argilosos - barros de Beja.

No sentido de realizar uma caracterização preliminar, o mais completa possível, dos materiais em estudo principia-se pelos dados obtidos em campo e que, de alguma forma, podem contribuir para melhorar o conhecimento geológico da área em análise. As características químicas e mineralógicas dos materiais são analisadas separadamente para os gabros e para os solos residuais, seguida de uma comparação entre estas e os índices de meteorização para a rocha e solos residuais, de forma a inferir sobre a maturidade destes últimos. Segue-se a apresentação dos resultados dos ensaios geotécnicos, de caracterização física e mecânica, sobre os materiais em estudo, realizados em campo ou em laboratório, em amostras intactas e remexidas, com os respetivos comentários. Finaliza-se este capítulo com a apresentação de correlações entre ensaios que podem, de alguma forma, contribuir para facilitar a aquisição de dados em algumas das propriedades dos materiais.

No Anexo III constam todas as designações e geoferrênciação das amostras em estudo, mas no caso concreto dos gabros convém referir que, por constrangimentos de amostragem e acessibilidade, a maior parte dos ensaios foram realizados em provetes de variados blocos provenientes de dois locais específicos: ponto 31, próximo de Beringel, junto ao canal de adução da barragem do Pisão, e o ponto 32, junto à cidade de Beja, numa saibreira abandonada. As amostras do ponto 31 correspondem a gabros sem sinais de meteorização aparentes, W_1 . Por seu lado no ponto 32 foram colhidos dois tipos blocos; uns também sem meteorização (W_1) e outros pouco alterados (W_2) e com fraturas cimentadas. Num último ponto de ensaios em rochas, ponto 35, junto à cidade de Beja, determinou-se apenas a dureza ao ressalto e a resistência à compressão pontual. Este local não fez parte da seleção inicial de amostragem de rochas, dado não garantir a quantidade de blocos necessária para realização de todos os ensaios. Para os solos, das 30 amostras analisadas, 16 correspondem ao saprólito e 14 a solos argilosos, os barros de Beja, sobre as quais se realizaram diversos ensaios.

4.1. Reconhecimento de superfície

Nesta secção resumem-se os principais dados recolhidos durante os levantamentos de campo.

O gabro apresenta-se maioritariamente no seu aspeto típico, de grão médio e melanocrata mas também foram identificadas amostras de grão mais grosseiro e gabros mais claros e de granulometria fina, indicando possivelmente o predomínio de plagioclases – leucogabros, (N38°01,210' W007° 51,900'). O gabro, na zona de transição com o saprólito, apresenta-se com fraturas próximas com espaçamento de pelo menos 10cm, abertura das fraturas inferior 1mm, estando a rocha ora medianamente ora pouco meteorizada (W2-W3).

Para área em referência foram identificados alinhamentos tectónicos com direções de N-S, NE-SW e NW-SE, em concordância com os alinhamentos definidos na bibliografia e descritos na secção 2.2.1; no entanto pela análise da figura 4.1, onde se representam em roseta os resultados da projeção estereográfica dos 206 dados recolhidos nos locais de levantamento de campo, denota-se a forte influência da falha de Beja, com alinhamento próximo de E-W.

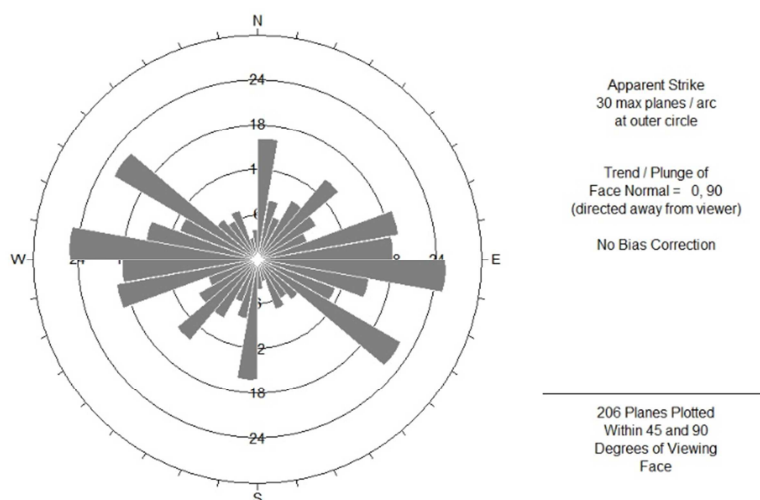


Figura 4.1 – Representação estereográfica dos principais planos de descontinuidades presentes nos levantamentos de campo da área em estudo, *software* Dips da Rocscience

Ao longo das fraturas identifica-se a circulação de água devido ao aspeto ferruginoso (cor alaranjada) resultado da oxidação dos minerais das respetivas paredes. Em certos locais, a alteração típica em bolas e em “casca de cebola” é visível; nestes locais e a envolver as bolas encontra-se material bastante meteorizado, W₅, sendo as “bolas” compostas de material resistente W₁₋₂. Localmente, o gabro pode encontrar-se cortado por filões de quartzo e feldspato com possanças variadas, desde 10 a 60 cm ou, ainda, filões de carbonatos ou com preenchimentos argilosos. Aos gabros encontram-se

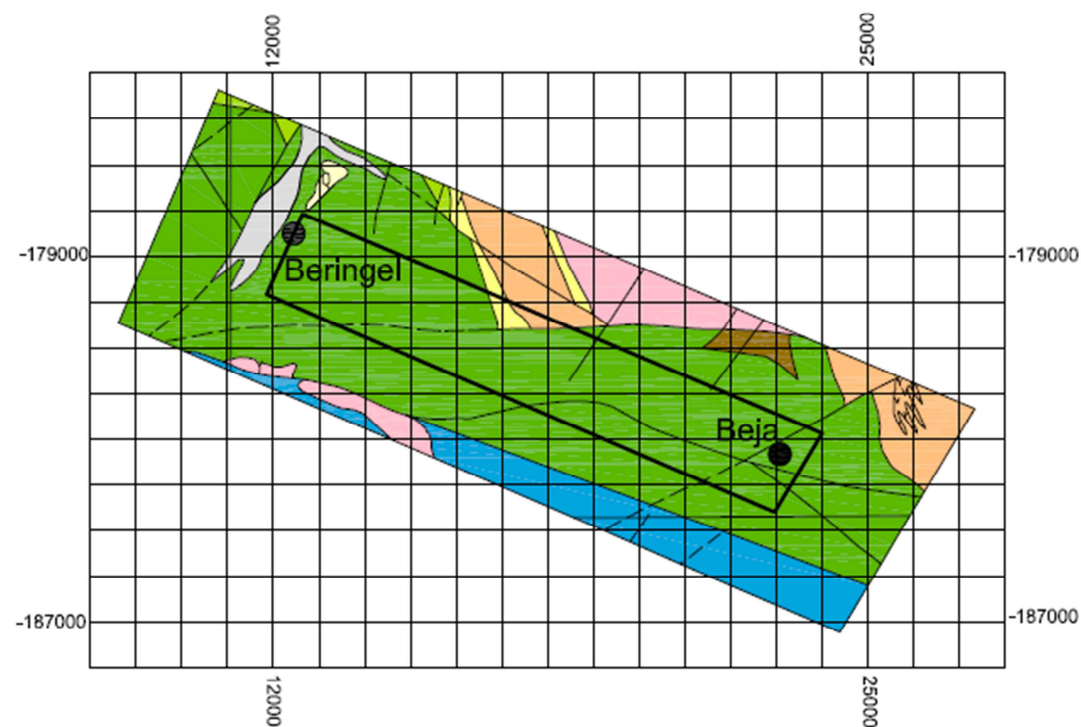
também associadas mineralizações de óxidos de ferro, como é o caso de magnetites, visíveis em afloramento em pequenas massas (N38°01,671' W007° 51,086' e N38°00' 26,89'' W007° 51' 57,58''). As observações realizadas indicam que a presença de filões quartzo-feldspáticos e de zonas mineralizadas parece estar diretamente relacionada com a presença de zonas de falha.

Diretamente em cima da rocha fraturada encontra-se o saprólito, que na maioria dos casos só está visível em perfis de escavação. O saprólito, como resulta predominantemente da evolução da meteorização ao longo da fracturação intensa do maciço, vai exibir uma granulometria grosseira, variando entre a areia grossa e o cascalho, com pequena percentagem de finos.

Pelo que foi possível observar em profundidade, o perfil de meteorização dos gabros nem sempre é constante, pois embora predomine a sequência em que ao gabo se sucede o saprólito, mais ou menos espesso, e a este, os solos argilosos, barros de Beja, algumas vezes por cima do saprólito encontramos apenas os caliços.

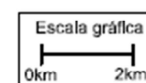
Pelas observações de campo não foi possível estabelecer com certeza uma relação direta entre as variações da espessura dos solos no perfil de meteorização e a sua distribuição espacial. Ao longo da área investigada predominam em extensão os barros de Beja, recobertos frequentemente por caliços, cuja ocorrência ocorre predominantemente a sul da cidade de Beja e junto à localidade de Beringel. Os barros apresentam normalmente pequenas espessuras, variando entre os 0,15 e 1,5m. No campo parece existir uma relação direta entre a formação destes solos e os locais de deficiente drenagem, frequentemente associados a linhas de água, sendo exatamente nestes locais onde se atingem as maiores espessuras. São aliás as condições de fraca drenagem, regiões aplanadas com climas de estação seca longa, pluviosa curta e ambientes químicos alcalinos, que favorecem a neoformação de montmorilonite em solos associados a rochas ígneas básicas (Gomes , 1988).

Os levantamentos de campo permitiram ainda contribuir para o conhecimento geológico/litológico mais detalhado da área, dando indicação de que os gabros se estendem mais do que o delimitado na cartografia geológica publicada, para sul da cidade de Beja. Este pressuposto sustenta-se pela presença de gabros e dioritos na linha de caminho-de-ferro junto ao vértice geodésico do Cerejo (N37°57,814, W007°52,976') e pelas características dos barros de Beja analisados (amostra 20). A norte da cidade foi identificado um afloramento de rochas de granulometria fina, siliciosas e melanocratas, que se identificaram como granodioritos - microgranodioritos (N38°01,683', W007°51,064'). A figura 4.2 pretende contribuir de uma forma sumária para o esboço litológico da área em investigação.



LEGENDA:

Símbologia	Unidades litológicas	Unidade geológica	Idade
	Aluviões predominantemente grosseiros	Bacia do Sado e Moura	Quaternário
	Cascalheiras e areias de terraços fluviais e depósitos de vertente		
	Granófiros	CIB	Devónico médio- Carbónico
	Granodioritos		
	Gabros		
	Basaltos e diabases		
	Metagabros, serpentinitos e anfibolitos	COBA	Devónico inferior
	Mármore com forsterite	Antiforma de S. Brissos - Naves	Cámbrico inferior
	Gneisses anfíbólicos e anfibolitos	Antiforma de S. Brissos - Naves	Proterozóico Superior



Área em estudo

Figura 4.2 – Esboço da cartografia litológica sumária elaborada para a área em estudo


4.2 Caracterização química e mineralógica

Dos fatores intrínsecos à rocha e/ou aos solos que mais condicionam a sua meteorização e evolução, e consequentemente as suas propriedades mecânicas e de compressibilidade, salientam-se a mineralogia e a textura, pelo que o seu conhecimento é determinante. Para os gabros apresentam-se os resultados da observação macroscópica e microscópica da respetiva textura, cor e mineralogia, através da observação a olho nu, em lâmina delgada, ao microscópio, bem com os valores obtidos em análises de difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X (FRX). Para os solos apresentam-se apenas os resultados da DRX e FRX, detalhando-se estudo das propriedades da sua fração fina. No sentido de contribuir para avaliar a evolução geoquímica do perfil de meteorização dos gabros, aplica-se a determinação de índices de variação química aos resultados previamente apresentados, propostos por diversos autores, como referido na secção 1.4.1, que pretendem quantificar a intensidade da meteorização e avaliar a maturidade dos solos residuais.

4.2.1 Gabros

A tabela 4.1 introduz a descrição macroscópica dos gabros amostrados para estudar as propriedades geotécnicas.

Tabela 4.1 – Descrição macroscópica dos gabros em estudo

Descrição macroscópica	<p>Rocha compacta, melanocrata, de cor cinzento escuro, textura fanerítica frequentemente equigranular, normalmente de grão médio (A) mas sendo possível encontrar variedades de grão fino (B) ou grão grosseiro (no interior da cidade de Beja). A sua cor indicia a presença de minerais ferromagnesianos, minerais máficos, indicadores de uma rocha básica.</p> <p>Às vezes são visíveis sinais de alteração / meteorização que se traduzem em tons esverdeados, devido à presença de serpentina, ou zonas avermelhadas resultantes de oxidação e presença de óxidos de ferro.</p>
	

A descrição apresentada é concordante com a bibliografia da especialidade consultada (Botelho da Costa, 1985).

A tabela 4.2 resume as características microscópicas da rocha em estudo (MacKenzie *et al.*, 1982) (MacKenzie & Guilford, 1996), após a observação de várias lâminas delgadas.

Tabela 4.2 – Descrição microscópica dos gabros em estudo

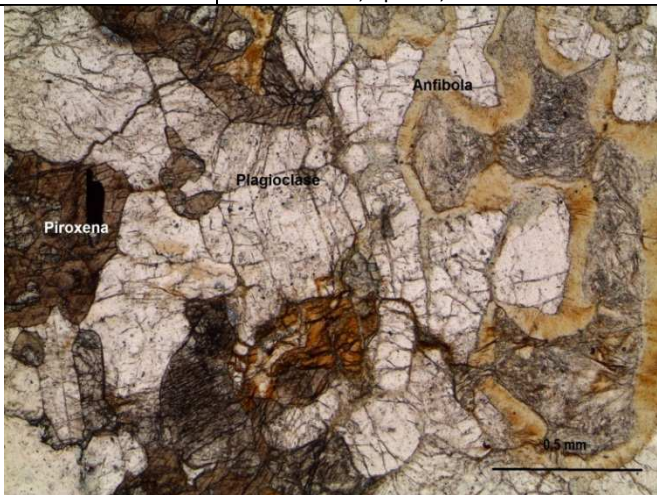
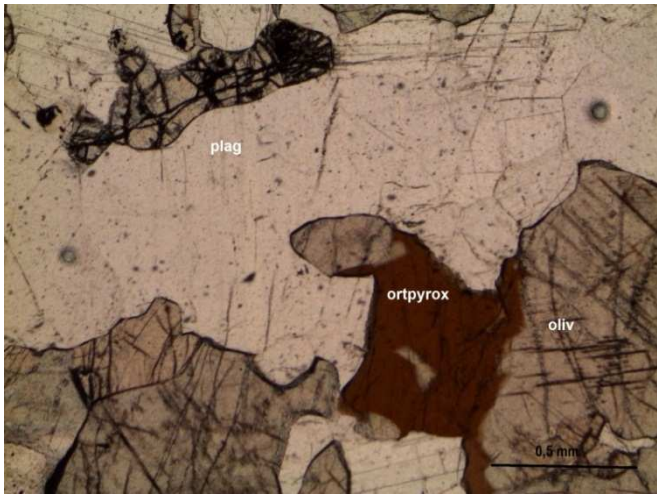
Descrição microscópica	<p>Rocha holocristalina, de granulometria média com maioria dos cristais subédricos ou seja hipidiomórficos</p> <p>Nas amostras, não meteorizadas, observadas foram identificadas cerca de 63% de plagioclases, com clivagem nítida, cerca de 14% de piroxenas e cerca de 8% de olivinas, as anfíbolos, a hiperstena e a biotite rondam no conjunto uma percentagem aproximadamente de 10%.</p> <p>Em algumas amostras (Ponto 32) foi identificada a textura corona, com piroxenas envolvidas por coroas de anfíbola.</p>	
Minerais essenciais	Plagioclases, piroxena e olivina	
Minerais acessórios	Horneblenda, opacos, anfíbola secundária e óxidos de ferro	
		<p>Microfotografia de gabro em lâmina delgada, nicóis paralelos, onde é visível a textura tipo corona, com a piroxena envolvida por anfíbola</p>
		<p>Microfotografia de gabro em lâmina delgada, em nicóis paralelos, onde se identificam os minerais essenciais, plagioclase (plag), ortopiroxena (ortpyrox) e olivina (oliv)</p>

Tabela 4.2 – Descrição microscópica dos gabros em estudo (cont.)



As observações apresentadas anteriormente contêm aspetos semelhantes às efetuadas por outros autores e apresentadas no capítulo 3 para os gabros de Beja, mas no Sector poente do CIB.

Os valores obtidos para a composição química, das amostras de gabros selecionados, e cuja localização consta do anexo III, estão resumidos na tabela 4.3 e enquadram-se com os referidos nos da tabela 1.11, assim como com os valores obtidos para os gabros do CIB e do maciço eruptivo de Sines. A seleção das amostras 7 e 20 teve em conta a sua localização geográfica sendo que representam, respetivamente, gabros dentro da cidade de Beja e gabros próximos do limite da zona CIB-COBA. As amostras 31 e 32 correspondem aos principais pontos de amostragem para os ensaios de caracterização física e mecânica, realizados. Os valores obtidos e traduzidos na tabela 4.3 encontram-se dentro do expectável para a composição média dos gabros (Botelho da Costa, 1985), salientando-se apenas na amostra 20 a percentagem mais elevada do SiO_2 do que a que seria de esperar, facto que deve estar relacionado com a proveniência da amostra, próximo da transição

entre o CIB e o COBA e eventualmente resultar de um magma mais rico em sílica. Os valores de LOI registrados refletem o conteúdo de água da amostra (Ng *et al.* 2000) e a comparação deste valor na rocha mãe e nos solos residuais fornecem indicações quanto à hidratação decorrente dos processos de meteorização.

Tabela 4.3 – Composição química das amostras do gabro são (W_1), em percentagem modal

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	TiO ₂	LOI
7	48,40	17,22	10,73	1,42	10,2	8,20	0,08	0,31	0,02	0,05	0,19	2,90
20	54,77	15,90	9,32	2,41	9,30	5,85	0,05	0,04	0,02	0,19	0,42	1,80
31	50,94	20,31	12,32	2,50	5,85	5,28	1,33	0,38	0,01	0,08	0,31	0,52
32	51,56	19,35	13,50	2,02	7,29	4,60	0,03	0,26	-	0,08	0,33	0,76

A identificação mineralógica microscópica foi confirmada pela análise de DRX. A identificação dos minerais presentes no difratograma é efetuada, como referido no Capítulo 3, recorrendo à comparação com valores padrão citados na bibliografia. Das análises efetuadas, num total de 7 amostras, ilustram-se os resultados das amostras 31 e 32 de gabro, por serem aquelas onde foram executados os ensaios mecânicos e por se revelarem representativas do conjunto analisado. Os respetivos resultados podem ser observados nas figuras 4.3 e 4.4.

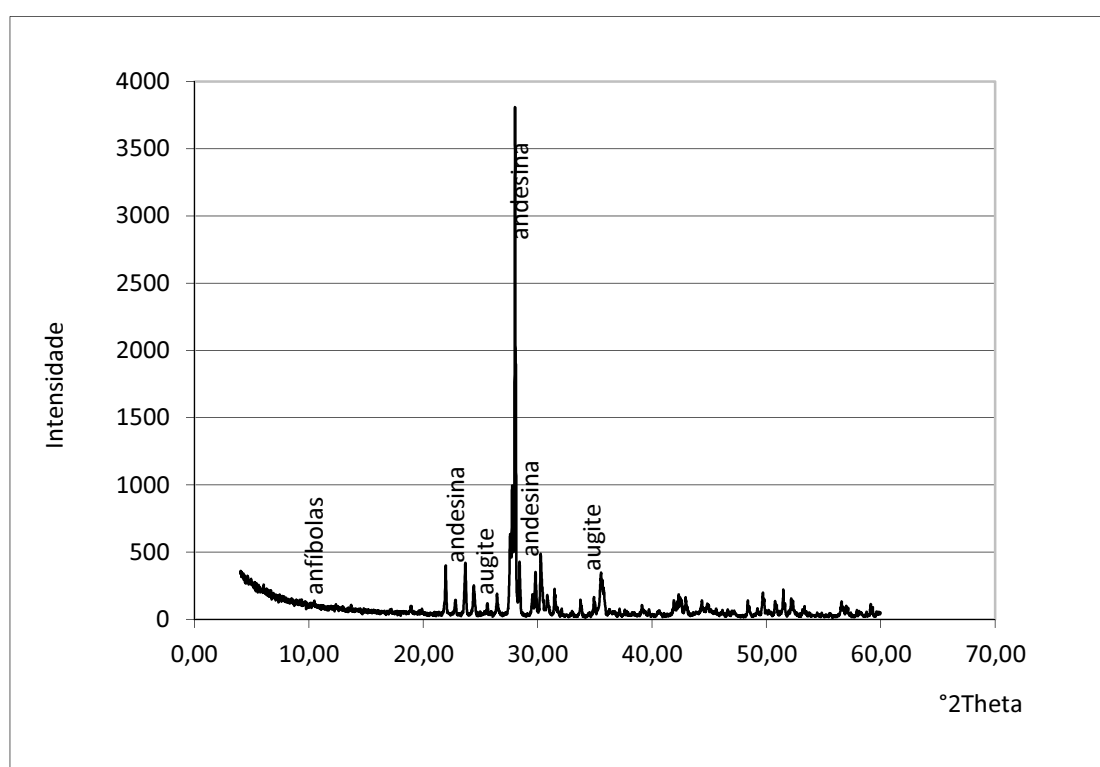


Figura 4.3 – Difratograma correspondente ao gabro da amostra 31

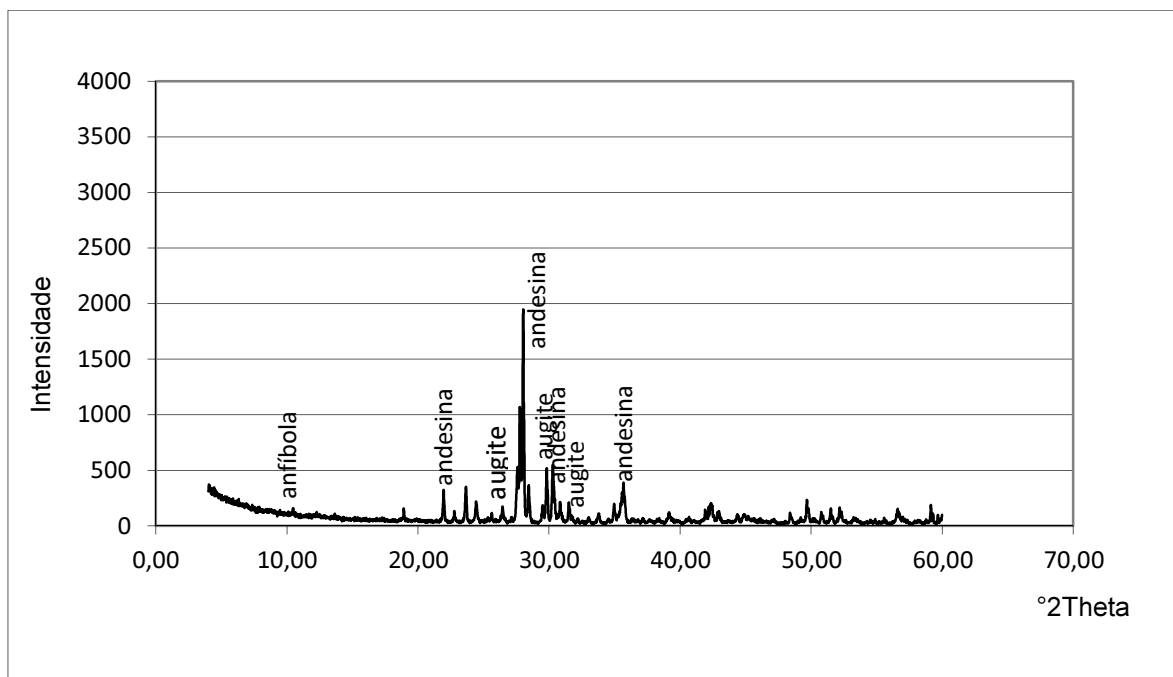


Figura 4.4 – Difrátograma correspondente ao gabro da amostra 32

Pelos resultados ilustrados observa-se que estas rochas são muito semelhantes entre si. As figuras 4.3 e 4.3 permitem ainda concluir que a DRX corrobora as observações microscópicas. Identificam-se plagioclases da série calcossódica (andesina), piroxenas (augite) e anfíbolas, minerais essenciais do gabro. Salienta-se no entanto o facto de os resultados serem em número insuficiente e de haver uma probabilidade elevada de existirem outro tipo de plagioclases, para além de andesina, nestas rochas.

4.2.2 Solos residuais

Para a caracterização dos solos residuais foram analisadas amostras do saprólito e dos solos argilosos mais superficiais - barros de Beja. As amostras foram selecionadas, após análise macroscópica a todas as amostras colhidas, por se revelarem representativas dentro do respetivo grupo. Para ambos os casos, saprólito e barros, apresentam-se os resultados obtidos para a respetiva composição química e para a DRX.

No caso dos solos argilosos foi necessário realizar a análise DRX de agregados orientados, dado ser esta a técnica mais apropriada para a identificação da fração argilosa, como referido no capítulo 3. A análise da fração fina em pó, para além da forma natural, foi também submetida ao tratamento com etilenoglicol e aquecimento até aos 500°C, como descrito na seção 3.4.1.1. A tabela 4.4 resume a composição química modal dos solos residuais: as amostras 1, 7, 12 e 14 correspondem ao saprólito

e as amostras 18, 22 e 23, aos barros de Beja (assinaladas com sombreado cinza). A figura 4.5 ilustra o difratograma correspondente à amostra 14. Dado que os ensaios de DRX foram efetuados em duas instituições distintas, com *output* de gráficos diferentes, optou-se por ilustrar para o saprólito o gráfico semelhante aos das rochas, sendo apenas distintos os gráficos das argilas, representando os respetivos tratamentos.

Tabela 4.4 – Composição química de três amostras de solos residuais em percentagem modal

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	TiO ₂	LOI
1	43,48	12,23	20,88	0,73	6,91	6,43	0,26	0,12	0,02	0,08	0,29	8,37
7	54,67	14,16	7,94	0,76	10,1	8,25	0,03	0,03	0,02	0,05	0,26	3,51
12	50,91	19,95	9,20	1,01	7,08	5,87	0,26	0,03	-	0,17	0,25	5,09
14	52,59	16,56	5,91	0,93	5,78	9,78	3,03	0,02	0,01	0,14	0,72	4,28
18	52,66	21,57	3,96	0,49	3,49	7,20	2,44	0,05	0,02	0,15	0,72	7,08
22	53,99	18,47	5,75	0,5	3,5	7,56	0,06	0,11	0,14	0,2	0,9	8,61
23	53,25	16,88	9,21	0,56	4,3	5,73	0,09	0,11	0,03	0,19	0,69	8,7

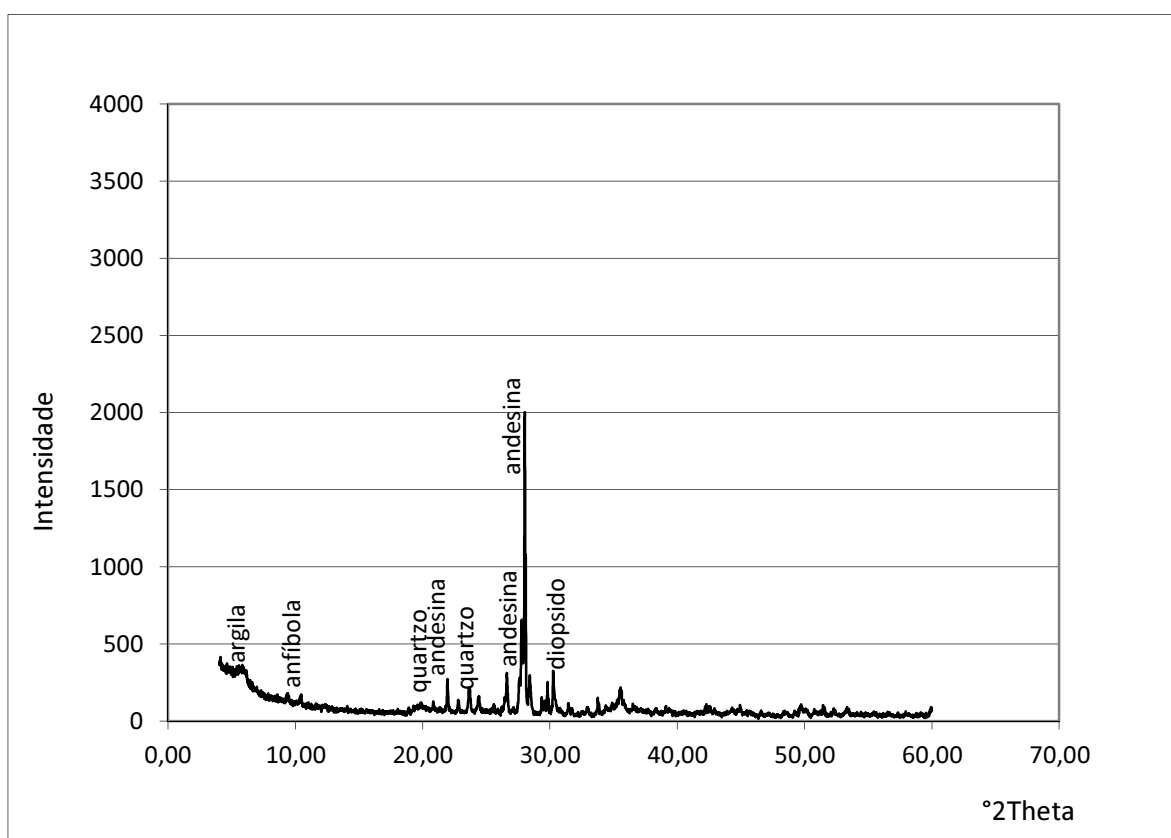


Figura 4.5 – Difratograma correspondente ao solo residual da amostra 14 (saprólito)

Da análise da figura 4.5 pode verificar-se que o saprólito contém ainda os minerais primários do gabro, como as plagioclases, piroxenas (diópsido) e anfíbolas. Contudo, já denota a presença de minerais argilosos, clorite-esmectite, bem como de quartzo, que pode relacionar-se com os filões tardios que cortam a rocha mãe.

As figuras 4.6 a 4.8 ilustram os difratogramas orientados da amostra 18 (barros de Beja), com os tratamentos realizados e em estado natural, salientando a relevância do tratamento efetuado para identificar adequadamente os minerais argilosos presentes.

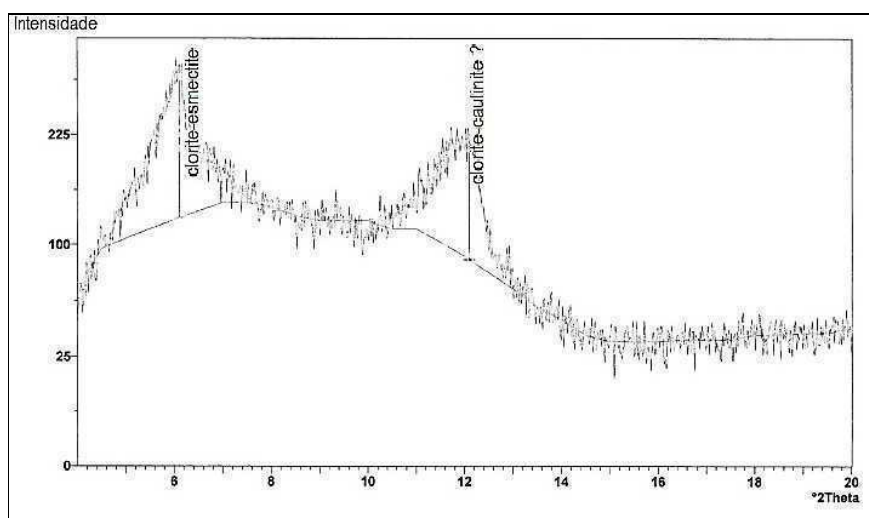


Figura 4.6 – Difratograma correspondente ao solo residual da amostra 18, no estado natural

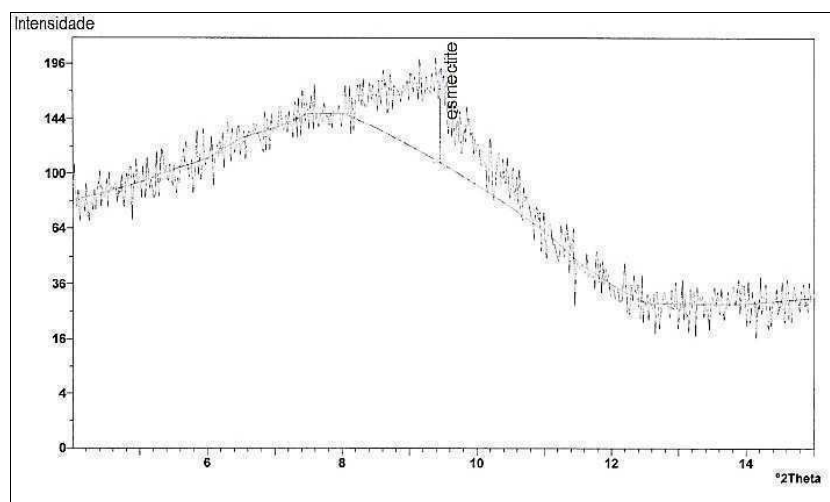


Figura 4.7 – Difratograma correspondente ao solo residual da amostra 18, aquecida a 500°C

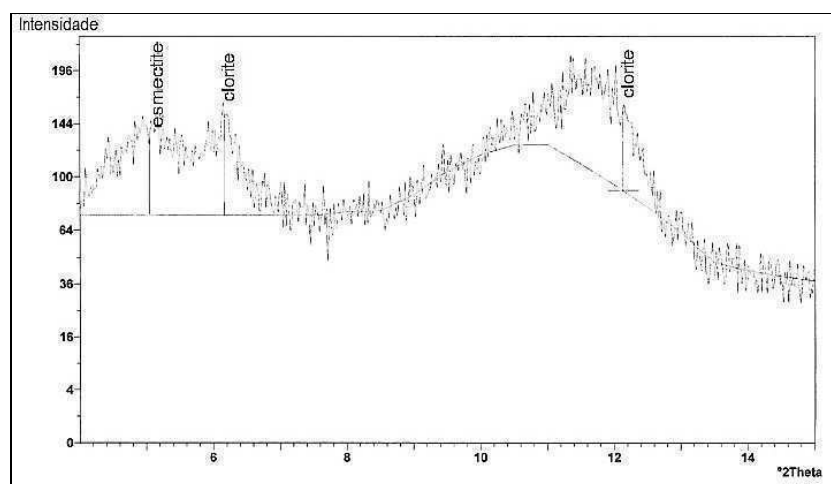


Figura 4.8 – Difratoograma correspondente ao solo residual da amostra 18, glicolada

A identificação dos minerais de argila é feita de acordo com a posição dos picos nos difratogramas. Podem citar-se como valores de referência, para amostras glicoladas, 15-17 Å para o grupo da esmectite, incluindo a interestratificada, 10 Å para a illite e 7 Å para a caulinite/clorite (Liu *et al.*, 2009). O tratamento das amostras é determinante para a identificação dos minerais do grupo da esmectite, como a montmorilonite, já que é visível um deslocamento do respetivo pico nos diferentes difratogramas, figuras 4.6 a 4.8. Este facto é confirmado por outros autores (Albers *et al.*, 2002) de acordo com a tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Posições referentes aos picos principais dos minerais de argilas em amostras com diferentes tratamentos (Albers *et al.*, 2002)

Minerais	Distância interplanar (Å)		
	Amostra natural	Amostra glicolada	Amostra aquecida a 500°C
Caulinite	7	7	-
Illite	10	10	10
Clorite	14	14	14
Clorite expansível	14	17	14
Montmorilonite 12	12	17	10
Montmorilonite 14	14	17	10
Vermiculite	14	14	10

As proporções relativas dos minerais identificados foram determinadas no Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro, pelo método das áreas dos picos (Klein & Dutrow, 2008) e incluem-se na tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Semi quantificação, em percentagem, dos minerais presentes na fração argilosa de três amostras de barros de Beja ensaiadas

Minerais argilosos	Fórmula química	Amostra 17	Amostra 18 (%)	Amostra 20
Esmectite (montmorilonite)	$(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	59,0	54,0	100,0
Esmectite - illite	interestratificado	41,0	46,0	traços
Clorite	$(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_6$	traços	traços	traços

Como se nota da análise da tabela 4.6, as argilas presentes nas amostras dos barros de Beja analisadas dividem-se, maioritariamente, entre dois grupos: esmectite e interestratificado de esmectite-illite.

As argilas do grupo da esmectite exibem expansão quando em contacto com a água devido à sua capacidade de incorporar moléculas desta, de forma intersticial, em associação com os catiões Na^+ e Ca^{2+} . Estas moléculas de água são expulsas quando a argila é aquecida provocando o colapso da estrutura e transformando-a numa outra, semelhante à illite. A absorção de catiões presentes no solo através da sua superfície carregada negativamente, confere às esmectites uma elevada capacidade de troca catiónica (Klein & Dutrow, 2008), que é bastante mais baixa para os outros grupos de argila (Vallejo & Ferrer, 2011). A argila mais frequente dentro do grupo das esmectites é a montmorilonite. A capacidade de troca catiónica e de expansibilidade em contacto com a água depende, por assim dizer, da pureza da esmectite dado que, no caso de esta ser interestratificada, esmectite-illite, as suas propriedades serão alteradas, no sentido da diminuição do poder de absorção de água e de troca catiónica.

Estas argilas expansivas, montmoriloníticas, são as que resultam geralmente da meteorização das rochas ígneas básicas e ultrabásicas, mas em certos casos, em rochas ricas em sílica e minerais com catiões de cálcio e magnésio (Al-Rawas *et al.*, 1998), e sob influência de climas em que a evaporação excede a precipitação, como acontece frequentemente no Alentejo, onde o pH é elevado, são favorecidas as condições de lixiviação, originando a formação de montmorilonites.

De salientar a elevada discrepância entre os valores obtidos para as amostras ensaiadas para os catiões K^+ , Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} (tabela 4.7) e os valores disponíveis na bibliografia consultada (tabela 4.8), facto que poderá ser explicado pela profundidade e localização geográfica dos locais de recolha das amostras, dentro do CIB, por diferentes metodologias aplicadas nestas determinações e/ou pelo reduzido número de amostras analisadas.

Tabela 4.7 – Valores dos catiões de potássio, sódio, magnésio e cálcio, das amostras de solos residuais - barros de Beja – ensaiadas

Amostra nº	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	(meq/100g)			
17	0,47	1,26	50,28	82,93
18	0,47	1,17	53,32	91,32
20	1,02	10,18	65,91	109,23

Tabela 4.8 – Valores dos elementos potássio, sódio, magnésio e cálcio, apresentados por Cardoso para solos residuais da região de Beja, designados de barros pretos - Bp (Carvalho-Cardoso, 1965)

Amostra nº	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
	(meq/100g)			
Bp 41	0,27	0,51	7,30	18,30
Bp 57	0,96	0,11	4,80	21,00

Pelo exposto acima se reconhece que a capacidade de troca catiónica dos minerais de argila terá implicação nas propriedades físicas com interesse para a engenharia geológica. Esta capacidade de troca catiónica traduz a quantidade de todos os catiões que um mineral pode absorver na sua estrutura. Existem várias classificações e correlações entre a expansibilidade das argilas e a respetiva plasticidade; (Isik Y., 2006) propõem uma relação entre a capacidade de troca catiónica (CEC), o limite de liquidez (W_L) e a expansibilidade das argilas (figura 4.9).

Para as amostras dos barros de Beja em estudo, registaram-se os valores de capacidade de troca catiónica incluídos na tabela 4.9. A tabela 4.10 representa os valores propostos por (Vallejo & Ferrer, 2011) para a CEC dos principais grupos de argilas.

Tabela 4.9 – Capacidade de troca catiónica para as amostras de solos dos barros de Beja

Amostra nº	CEC (meq/100g)
17	17,8
18	18,8
20	18,6

Tabela 4.10 – Valores de capacidade de troca catiónica apresentados por (Vallejo & Ferrer, 2011)

Minerais	CEC (meq/100g)
Esmectite	80-150
Ilite	10-40
Caulinite	1-10

Da observação de ambas as tabelas pode concluir-se que os minerais presentes nas amostras ensaiadas dos barros de Beja, 17, 18 e 20, têm valores moderados de capacidade de troca catiónica, mais próximos da ilite do que da esmectite, o que se pode explicar pela presença de interestratificados de esmectite-ilite, como indicam os difratogramas de raios X, não exibindo as propriedades típicas da esmectite e diminuindo a reatividade em presença da água.

Na figura 4.9 projeta-se a representação dos resultados médios das amostras de solos coesivos estudados. Dado que os valores obtidos para as três amostras são muito semelhantes, optou-se pela representação do seu valor médio.

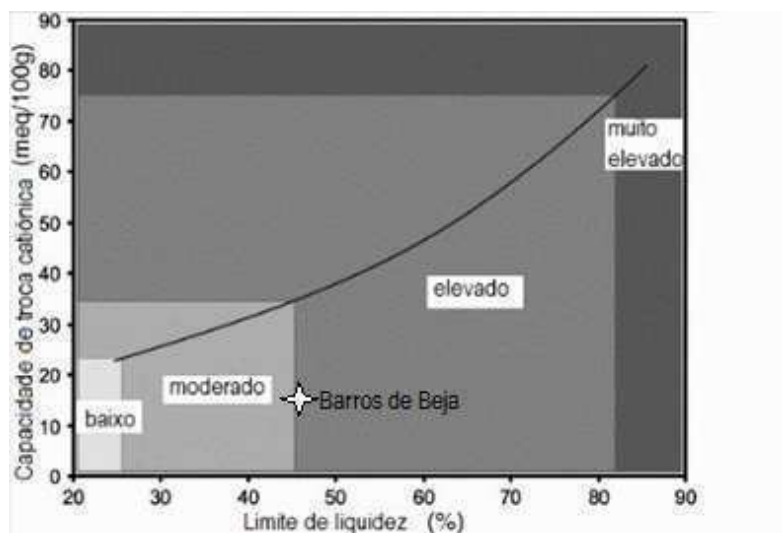


Figura 4.9 - Proposta de classificação da expansibilidade em função da capacidade de troca catiónica e do limite de liquidez segundo (Isik Y., 2006) onde se projetam os resultados médios para os barros de Beja

Para as mesmas amostras foram realizados ensaios de determinação do teor em matéria orgânica (MO), de acordo com a metodologia descrita na secção 3.2.2.1 c), cujos resultados incluem a tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Matéria orgânica determinada para as amostras de solos dos barros de Beja

Amostra nº	MO (%)
17	0,47
18	0,32
20	0,19

Dos resultados obtidos, verifica-se que estes solos são pobres em matéria orgânica, ao contrário do que a sua cor castanho-escuro faria prever (anexo III).

4.2.3 – Rocha mãe *versus* solos residuais

Com base nos dados químicos disponíveis atentou-se à análise da mobilidade dos elementos, desde a rocha mãe até aos solos argilosos mais superficiais e ligeiramente mais evoluídos do que o saprólito. Estimaram-se as profundidades médias a que cada nível do perfil de meteorização se encontra, e obtiveram-se os resultados ilustrados na tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Distribuição, em profundidade, da composição química média das amostras analisadas

Litologia	Prof.* (m)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	TiO ₂	LOI
Barros	0,15	53,30	18,97	6,31	0,52	3,76	6,83	0,86	0,09	0,06	0,18	0,77	8,13
Saprólito	1,50	50,41	15,73	10,98	0,86	7,47	7,58	0,90	0,05	0,02	0,11	0,38	5,31
Gabro	3,00	51,42	18,20	11,47	2,09	8,16	5,98	0,37	0,25	0,02	0,10	0,31	1,50

* profundidade média estimada

Os ganhos e as perdas a nível químico desde a rocha mãe até ao solo residual argiloso, passando pelo saprólito, permitem ter uma ideia da mobilidade dos elementos e da quantificação da meteorização ao longo do perfil (Aires-Barros, 1978). Da observação da tabela 4.12, conclui-se que, desde a rocha mãe até ao solo residual mais evoluído, mais argiloso, há um aumento dos teores de SiO₂, de Al₂O₃, de Fe₂O₃, de P₂O₅, de K₂O e de TiO₂ sendo que, de todos, o aumento dos teores de SiO₂ e de Al₂O₃ são os menos significativos, diminuindo para o saprólito e aumentando ligeiramente para o solo argiloso. No que diz respeito às perdas, regista-se que diminuem o CaO, o Na₂O, o MgO e o SO₃, componentes que apresentam elevada mobilidade. A calchificação pode estar na origem da remoção destes

óxidos, que os vai concentrar nos calços, deixando nos solos residuais elementos com menor mobilidade como os óxidos de ferro. O LOI, correspondendo aos voláteis, particularmente à água presente, aumenta consideravelmente desde a rocha até às argilas, como seria de esperar e ilustrando o facto de que maior meteorização significa maior porosidade efetiva e, portanto, maior é a potencial presença de água.

Desta análise pode ainda concluir-se que a maior variabilidade a nível químico se observa da rocha mãe para os solos argilosos, pois não existem grandes variações em termos de mobilidade de elementos desde esta para o saprólito, horizonte menos evoluído e que preserva ainda estruturas da rocha mãe e muitos dos seus minerais. A evolução mais acentuada em termos de meteorização é para o solo argiloso, barros de Beja, onde muitos dos minerais são secundários ou de meteorização.

Para a quantificação da meteorização são utilizados vários índices, propostos por diversos autores, como descrito no capítulo 1, secção 1.5.1 e resumidos na tabela 1.3. Eles foram calculados para a rocha mãe e para os solos residuais, respetivamente, no sentido de se determinar a evolução do perfil de meteorização e sintetizam-se esses valores nas tabelas 4.13 e 4.14.

Tabela 4.13 - Resumo dos índices de meteorização, mais comuns, aplicados às amostras de gabro

Amostra nº	R	WIP	V	CIA	CIW	PIA	STI	PWI	SFOR
7	2,81	3517,62	0,77	58,53	58,63	58,56	73,16	65,40	5,90
20	3,44	3893,90	0,77	57,15	57,55	57,25	75,95	71,19	9,36
31	2,51	3902,57	0,99	57,68	57,81	57,72	70,72	66,29	9,65
32	2,66	3956,86	0,85	55,36	55,49	55,39	71,82	67,99	11,21

Tabela 4.14 - Resumo dos índices de meteorização, mais comuns, aplicados aos solos residuais

Amostra nº	R	WIP	V	CIA	CIW	PIA	STI	PWI	SFOR
1	3,56	4231,78	0,43	36,06	36,14	35,99	76,63	69,65	6,76
7	3,86	2730,79	0,76	61,81	61,94	61,86	78,29	70,69	6,63
12	2,55	2814,10	1,16	65,78	66,15	65,96	71,20	66,13	8,67
14	3,18	2129,94	1,32	70,35	70,77	70,59	73,62	66,03	5,38
18	2,44	1353,49	2,74	82,42	82,90	82,80	69,30	64,10	7,31
22	2,92	1656,03	1,91	74,12	74,72	74,51	71,90	66,72	7,14
23	3,15	2265,49	1,21	62,89	63,34	63,08	73,64	69,56	9,29

*as amostras a cinza representam os barros de Beja

Os índices R, STI, PIW e SFOR não são conclusivos para o caso em estudo uma vez que não demonstram variação significativa entre o gabro e os respetivos solos residuais, facto que se pode justificar por estes índices dependerem do teor em sílica e esta não ter grande variação da rocha mãe para os solos, como referido na secção anterior.

Os índices WIP e V, ao relacionarem elementos de grande mobilidade como o CaO e o Na₂O, ilustram efetivamente para os gabros um perfil de evolução de meteorização, desde a rocha mãe, em profundidade, até aos solos argilosos, mais superficiais. Os valores do índice V situam-se entre 0 e 1, para a rocha mãe, de acordo com a tabela 4.13, mas segundo os dados da tabela 4.14 são superiores a 1,2 nos barros e no geral, não ultrapassam o valor de 3, o que de acordo com a tabela 1.3, indicia baixo grau de meteorização para este conjunto de solos residuais. O mesmo acontece com a variação dos valores de WIP, todos situados acima de 1000. Esta observação é também coincidente com os resultados obtidos para os índices CIA, CIW, PIA que apresentam comportamento semelhante entre si, revelando um aumento significativo desde o substrato rochoso, onde se situam próximo das seis dezenas, até aos solos argilosos, onde os valores rondam as oito dezenas, mas não atingem o valor das centenas indicado na tabela 1.3, da secção 1.4.1, para as rochas ígneas em geral.

Dos três grupos de índices assinalados na tabela 1.3, os índices WIP e V parecem ser dos mais indicados para os materiais em estudo, por representarem proporções entre elementos de elevada mobilidade e resultantes da meteorização dos minerais essenciais do gabro, nomeadamente os que contém sódio, cálcio, alumínio e magnésio. Esperava-se que o índice PIA, por representar a alterabilidade da plagioclase fosse mais relevante do que o CIW ou CIA. Tal parece não se verificar e, para os resultados obtidos, qualquer um destes três índices demonstra comportamento semelhante.

Da análise da tabela 4.14 verifica-se ainda que a amostra nº 1 exhibe os valores mais elevados para WIP e os mais baixos para os restantes índices calculados, facto que se deve à elevada percentagem de CaO desta amostra (20,88%). A mesma razão justifica as diferenças de resultados, dentro das três amostras de barros, para a amostra nº 23, com 9,21% de CaO.

4.3 Ensaio em solos residuais

Apresentam-se, nesta secção, os resultados dos ensaios realizados em solos residuais do gabro, distinguindo-se à partida os solos argilosos – barros de Beja, dos do saprólito, de granulometria mais grosseira e resultantes da meteorização direta da rocha mãe, confirmando a identificação visual efetuada no terreno.

A figura 4.10 resume a aplicação da classificação unificada – USCS, aos trinta solos ensaiados e nela se individualizam os dois grupos referidos, respetivamente: CL, argila magra - com pequena percentagem de areia e SM, areias siltosas a SC, areias argilosas com cascalho. Note-se que o aspeto errático do grupo de classificações relativas ao saprólito se divide apenas em dois subgrupos: o das areias e o dos cascalhos, todas as outras variações dependem essencialmente do tipo de finos presentes, traduzindo uma fronteira ténue entre frações argilosa e siltosa. Os dados obtidos estão de acordo com os dados coligidos em diversos estudos geológico-geotécnicos, não publicados, resumidos na tabela 2.2 e referidos na seção 2.2.5.

Por se tratar de dois solos com características geotécnicas distintas, a sua análise será separada e os ensaios realizados serão analisados separadamente, de acordo com a sua validade e exequibilidade em função do tipo de solo.

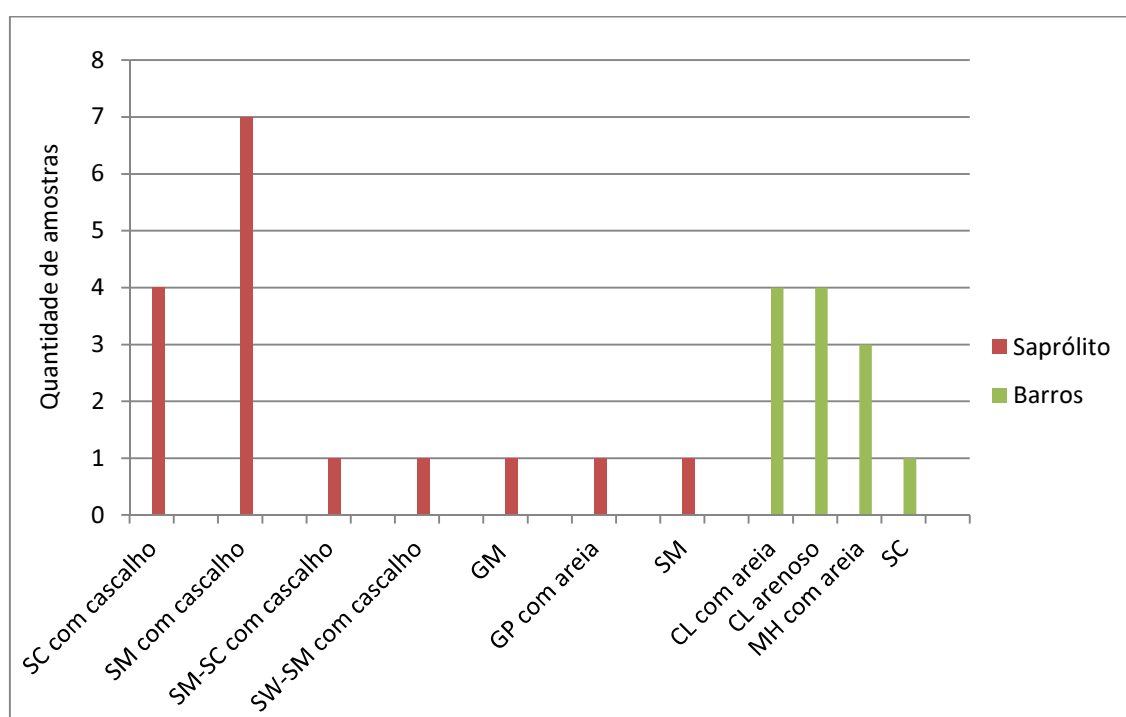


Figura 4.10 – Resumo da classificação geotécnica do conjunto de solos ensaiados

4.3.1 Solos do saprólito

O saprólito caracteriza-se por ser o solo residual situado, em regra, imediatamente sobre o gabro, sendo o resultado da sua degradação *in situ*. De acordo com as observações de campo trata-se de um solo grosseiro, onde predominam as frações areia e cascalho médio a grosso, de cor cinza a cinza acastanhado. A figura 4.11 ilustra o aspeto visual do saprólito e a figura 4.12 traduz as 16 curvas granulométricas obtidas para este solo, onde se verifica uma distribuição relativamente homogénea da granulometria.



A – mais arenoso (N38°0,195'W007°51,337'), B – mais cascalhento (N38°3,431'W007°57,415')

Figura 4.11 – Aspeto geral do saprólito do gabro

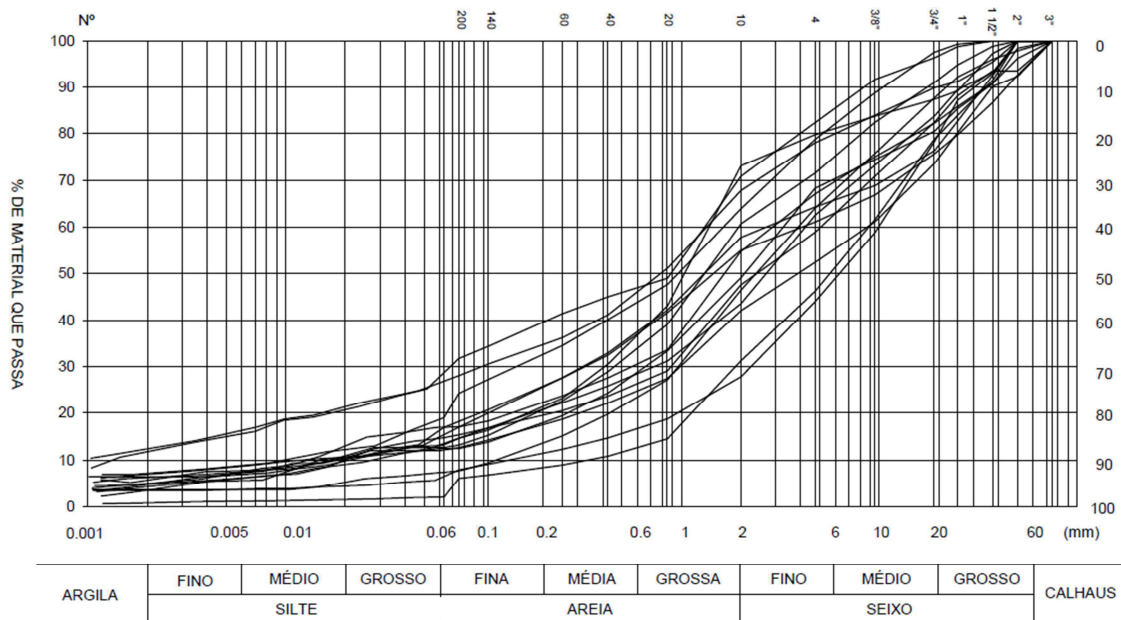


Figura 4.12 – Curvas granulométricas de amostras de solos do saprólito

Para estes solos foram determinados outros parâmetros geotécnicos, dos quais se apresentam os resultados integrais na tabela 4.15; teor em água (w), densidade das partículas (G_s), limite de liquidez (w_L), índice de plasticidade (I_p) e retração linear (L_s). Por limitações na quantidade de amostra não foi possível a realização do ensaio de retração linear para as amostras 9 e 10. A análise dos resultados permite concluir que estes solos são maioritariamente arenosos e apresentam limites de retração linear e índices de plasticidade muito baixos, inferiores, respetivamente, a 9% e 14 %, atingindo mínimos de 0% e 3%, respetivamente. São solos de baixa plasticidade, tendo sido apenas identificada uma amostra com fração fina superior a 40%, o que se reflete na classificação AASHTO, dado que apenas essa amostra apresenta índice de grupo diferente de zero.

Tabela 4.15 – Parâmetros geotécnicos determinados para o saprólito, e respetiva classificação geotécnica

Amostra nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Profundidade (m)	4,5	2	1	0,5	1,5	3	4	6	0,5	1	0,7	1,5	0,5	0,5	3	0,5
w (%)	3,8	4,3	4,9	2,0	2,0	7,0	6,8	9,0	3,2	13,0	2,7	3,9	2,1	3,9	6,7	2,2
G _s	2,83	2,64	2,8	2,79	2,59	2,79	2,74	2,79	2,81	2,78	2,83	2,78	2,75	2,9	2,82	2,58
W _L (%)	30	36	36	29	28	31	31	37	33	33	28	31	38	29	42	35
I _p (%)	9	11	8	6	6	8	3	10	10	7	13	10	14	8	11	10
L _s (%)	3	4	7	4	0	3	4	5	-	-	4	1	8	6	9	3
% argila	5	8	11	6	6	4	6	3	5	3	3	4	5	7	12	11
% silte	10	16	17	12	11	4	7	3	8	13	5	9	12	10	16	32
% areia	29	40	40	40	41	38	48	25	29	32	20	36	38	38	43	51
% seixo	56	36	32	42	42	54	39	69	58	52	72	51	45	45	29	6
AASHTO	A-2-4 (0)	A-2-6 (0)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	A-2-6 (0)	A-2-4 (0)	A-2-6 (0)	A-2-4 (0)	A-2-7 (0)	A-4 (2)
USCS	SC com cascalho	SC com cascalho	SM com cascalho	SM com cascalho	SM-SC com cascalho	SW-SM com cascalho	SM com cascalho	GM	SM com cascalho	SM com cascalho	GP com areia	SM com cascalho	SC com cascalho	SC com cascalho	SM com cascalho	SM

GM – Cascalho siltoso; GP – Cascalho mal graduado; SC – Areia argilosa; SM – Areia siltosa, SW – Areia bem graduada

A tabela 4.16 resume as gamas de valores dos parâmetros geotécnicos destas amostras. Dos valores registados nessa tabela, aqueles que apresentam uma maior variação entre o seu máximo e mínimo, correspondem ao limite de liquidez e índice de plasticidade. Esta observação justifica-se com a existência neste grupo de solos do saprólito, quer de materiais mais cascalhentos com poucos finos, quer de materiais arenosos com finos em percentagem superior a 12%, de siltes ou argilas. O limite de retração linear (Hazelton & Murphy, 2007) é o aceitável para estes solos e encontra-se dentro dos valores esperados para solos que praticamente não apresentam retração. Os valores do teor em água natural correspondem a solos secos, colhidos acima do nível freático e em estação seca. O valor médio obtido para a densidade das partículas adequa-se ao tipo de solo em estudo, representando a maioria dos solos ensaiados (tabela 4.15).

Tabela 4.16 – Gama de valores de alguns parâmetros geotécnicos determinados para o saprólito

Grandezas		máximo	mínimo	média	desvio padrão
w (%)		13,0	2,0	4,8	2,92
G_s		2,9	2,6	2,8	0,09
W_L (%)		42,0	28,0	32,9	3,93
I_p (%)		14,0	3,0	9,0	2,67
L_s (%)		9,0	0,0	4,4	2,41
Granulometria	% argila	12,0	3,0	6,2	2,83
	% silte	32,0	3,0	11,6	6,65
	% areia	51,0	20,0	36,8	7,85
	% seixo	72,0	6,0	45,5	15,49

4.3.2 Solos dos barros de Beja

4.3.2.1 Ensaios de identificação

Os barros de Beja são solos residuais mais evoluídos do que o saprólito, encontrando-se frequentemente sobre eles - seção 4.1. Como referido na seção 4.2, trata-se de solos onde a meteorização química é mais evidente e em que a degradação química das olivinas e piroxenas contribuiu para a formação das argilas presentes nesses solos. São, por isso, solos finos, isto é com predomínio da fração argila e/ou silte, com percentagens menos significativas de areia e seixo fino, que correspondem ao gabro arenizado e/ou a fragmentos de quartzo e feldspato filonianos. A figura 4.14 inclui as 14 curvas granulométricas obtidas para os barros, que se desenvolvem predominantemente na zona da fração argila-silte, ilustrando o facto de serem solos finos embora com uma importante componente da fração areia. São solos que maioritariamente se classificam,

segundo a USCS, como CL – argila magra e MH – silte elástico pelo que são, respetivamente, solos que exibem plasticidade baixa a elevada, de acordo com os resultados obtidos, com limite de liquidez entre 30% e 68%, correspondendo um índice de plasticidade que varia entre 11% e 29% e uma retração linear baixa, 6%, a média-alta, 18 % (tabela 4.17). O poder de retração destes solos pode ser observado em campo através da existência de fendas de dessecação como as da figura 4.13A bem como o seu aspeto coesivo, na figura 4.13B.



A – fendas de dessecação (N38° 01,809' W007° 51,947'); B – aspeto geral em época chuvosa (N37° 59,304' W007° 53,587')

Figura 4.13 – Aspetos dos barros de Beja – no local de recolha da amostra 20

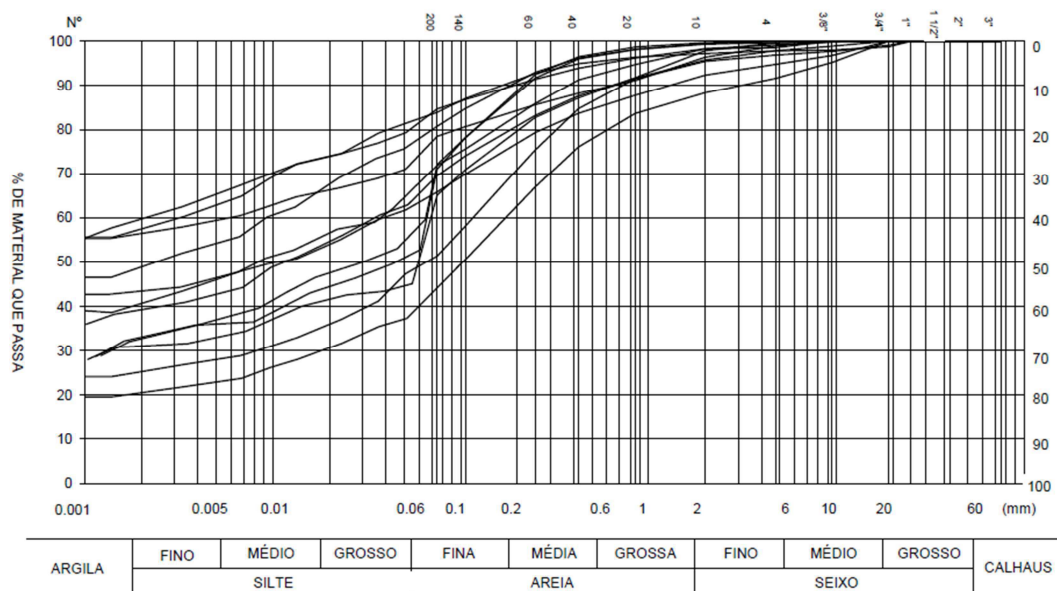


Figura 4.14 – Curvas granulométricas dos Barros de Beja

Para estes solos foram determinadas outros parâmetros geotécnicos, como teor em água (w), densidade das partículas (G_s), limite de liquidez (w_L), índice de plasticidade (I_p), índice de consistência

(I_c), atividade da argila (A_t) e retração linear (L_s), que se incluem na totalidade na tabela 4.17 e se resumem na tabela 4.18.

Pela análise dos resultados globais da tabela 4.17 podemos concluir que estes solos, sendo maioritariamente finos, apresentam percentagens de areia consideráveis, variando entre 13% e 44%, e em alguns casos podem inclusive apresentar seixo fino. São solos cujo índice de plasticidade varia entre 11% e os 29% e o limite de liquidez entre 30% e 68%, ficando ambos aquém do que seria de esperar para solos em que a fração argila revelou pertencer ao grupo da esmectite. Tal facto pode explicar-se pela presença de esmectite interestratificada – esmectite-ilite, como analisado na seção 4.2, e pela ampla variação da percentagem de argila nestes solos, entre 21% e 60%, que também demonstra serem solos que, embora mais maduros que os do saprólito, ainda são pouco evoluídos. O exposto justifica ainda a pouca atividade da fração argila – entre 0,35 e 0,62. Os valores registados para o índice de consistência, entre 0,93% e 2,26%, classificam estes solos como argilas rijas a duras (Fernandes, 2006), como confirmado em campo sempre que estes solos apresentam baixos teores em água.

Os barros são solos com plasticidade e fração fina relevante, o que se reflete na classificação AASHTO, dado que as amostras apresentam classificações com índices de grupo elevados.

Comentam-se ainda os elevados valores obtidos para o desvio padrão relativo ao teor em água e ao limite de liquidez (tabela 4.18), sendo que o primeiro representa a grande variabilidade do teor em água natural das amostras colhidas, considerando-se na dependência direta da altura do ano em que se efetuou a recolha embora a atividade química dos minerais de argila presentes e a sua quantidade possam ser fatores a considerar. São aliás estes dois últimos que mais condicionam a variabilidade obtida para os valores do limite de liquidez.

Tabela 4.17 – Parâmetros geotécnicos determinados para os solos dos barros de Beja e respetiva classificação geotécnica

Amostra nº	17	18	20	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Profundidade (m)	0,7	0,7	0,5	1,5	1	0,3-0,5	0,3-0,5	0,3-0,5	0,8	0,3-0,5	0,3-0,5	0,3-0,5
w (%)	19,5	17,7	22,8	41,1	28,4	5,7	5,1	10,7	7,0	8,0	10,0	10,3
G_s	2,71	2,53	2,81	2,74	2,81	2,78	2,83	2,69	2,61	2,73	2,68	2,82
W_L (%)	41	41	44	68	47	43	30	43	55	45	64	30
I_p (%)	20	20	19	29	19	21	11	18	23	17	27	13
I_c (%)	1,08	1,17	1,12	0,93	0,98	1,78	2,26	1,79	2,09	2,18	2,00	1,52
A_t	0,61	0,61	0,61	0,53	0,44	0,51	0,44	0,46	0,40	0,35	0,45	0,62
L_s (%)	14	14	11	18	17	14	8	14	18	15	16	6
% argila	33	33	31	55	43	41	25	39	57	49	60	21
% silte	39	40	34	23	29	25	27	31	28	32	25	24
% areia	28	27	33	19	23	27	44	26	13	19	14	43
% seixo fino	0	0	2	3	5	7	4	4	2	0	1	12
AASHTO	A-7-6 (11)	A-7-6 (12)	A-7-6 (10)	A-7-5 (20)	A-7-6 (16)	A-7-6 (11)	A-6 (4)	A-7-6 (11)	A-7-6 (16)	A-7-6 (12)	A-7-5 (19)	A-6 (3)
USCS	CL com areia	CL com areia	CL arenoso	MH com areia	CL com areia	CL arenoso	CL arenoso	CL arenoso	MH com areia	CL com areia	MH com areia	SC

CL – Argila magra; MH – Silte elástico; SC – Areia argilosa

Tabela 4.18 – Resumo dos parâmetros geotécnicos determinados para os solos dos barros de Beja

Grandezas		máximo	mínimo	média	desvio padrão
w (%)		41,1	5,1	15,5	10,44
G _s		2,8	2,5	2,7	0,09
W _L (%)		68,0	30,0	45,9	11,09
I _p (%)		29,0	11,0	19,8	4,87
I _c (%)		2,3	0,9	1,6	0,48
A _t		0,6	0,4	0,5	0,09
L _s (%)		18,0	6,0	14,5	2,84
Granulometria	% argila	60,0	21,0	40,6	12,13
	% silte	40,0	23,0	29,8	5,40
	% areia	44,0	13,0	26,3	9,52
	% seixo	12,0	0,0	3,3	3,35

4.3.2.2 Ensaios de caracterização mecânica e de compressibilidade

Amostras não perturbadas destes solos foram ainda sujeitos a ensaios de consolidação (edométrico), expansibilidade e corte direto colhidas em 5 locais de recolha - amostras 17 a 23. Os resultados são apresentados nas tabelas e figuras seguintes, com os devidos comentários.

a) Ensaio edométrico

A tabela 4.19 ilustra os resultados obtidos para os parâmetros do ensaio de consolidação, realizados de acordo com o descrito na secção 3.2.3.3, para a totalidade de ensaios realizados.

Tabela 4.19 – Resultados obtidos nos ensaios edométricos realizados em amostras dos barros de Beja

Amostras nº	Prof. (m)	w (%)	e ₀	γ _i (kN/m ³)	γ (kN/m ³)	h _f (cm)	S (%)	C _c [*]	C _r ^{**}
17	0,7	20,0	0,6	21,8	27,1	1,3	99,9	0,17	0,04
18	0,7	22,9	0,5	21,7	27,1	1,3	115,9	0,18	0,04
20	0,5	19,4	0,6/(0,6) [#]	21,0	28,1	1,3	91,0	0,22	0,05
22	1,5	34,2	0,9/(1,1) [#]	19,5	28,1	1,0	103,5	0,34	0,08
23	1,0	29,7	0,9/(0,8) [#]	19,5	28,1	1,1	96,5	0,33	0,06

*Consideradas tensões entre 100 e 800 kPa; ** Consideradas tensões entre 6 e 30 kPa; [#] valores *in situ*

O teor em água é o original da amostra tal qual foi colhida e o grau de saturação corresponde ao valor final do ensaio.

A não aplicação a todas as amostras do escalão de carga máxima de 32 kg, ou seja, aplicação de tensões próximas de 1600 kPa, prendeu-se com o facto de se ter considerado tensões demasiado elevadas para este tipo de solos e longe de solicitações a que normalmente são submetidos.

Como referido no capítulo 3, secção 3.2.2.2 a), os parâmetros estimados para estudar a evolução dos assentamentos por consolidação em solos finos são retirados das curvas resultantes do ensaio edométrico, que relacionam o índice de vazios e as tensões aplicadas, expondo-se na figura 4.15 as curvas obtidas.

Regra geral os valores para as cinco amostras são bastante próximos. O teor em água mais elevado das amostras 22 e 23 justifica-se por estas terem sido colhidas após alguns dias de precipitação e na margem de linhas de água. Os índices de vazios iniciais determinados pelo ensaio edométrico são muito próximos dos determinados *in situ*, utilizando blocos de amostras específicos para o efeito. Os valores obtidos foram, respetivamente para as amostras 20, 22 e 23 de 0,6, 1,1 e 0,8%. Salienta-se o facto de estes valores se encontrarem abaixo dos valores expectáveis para argilas e de não se destacarem dos valores obtidos para solos arenosos.

Pode observar-se pela figura 4.15 que o andamento das curvas obtidas é constante, registando-se apenas ligeiras variações no índice de vazios. Salienta-se que as amostras número 22 e 23 registaram, por um lado, uma maior variação no respetivo índice de vazios que se deverá ao facto dos teores em água iniciais destas amostras serem superiores, em mais de 10%, aos restantes valores (tabela 4.19) e por outro lado, terem sido recolhidas a uma profundidade quase dupla da profundidade de recolha das outras amostras.

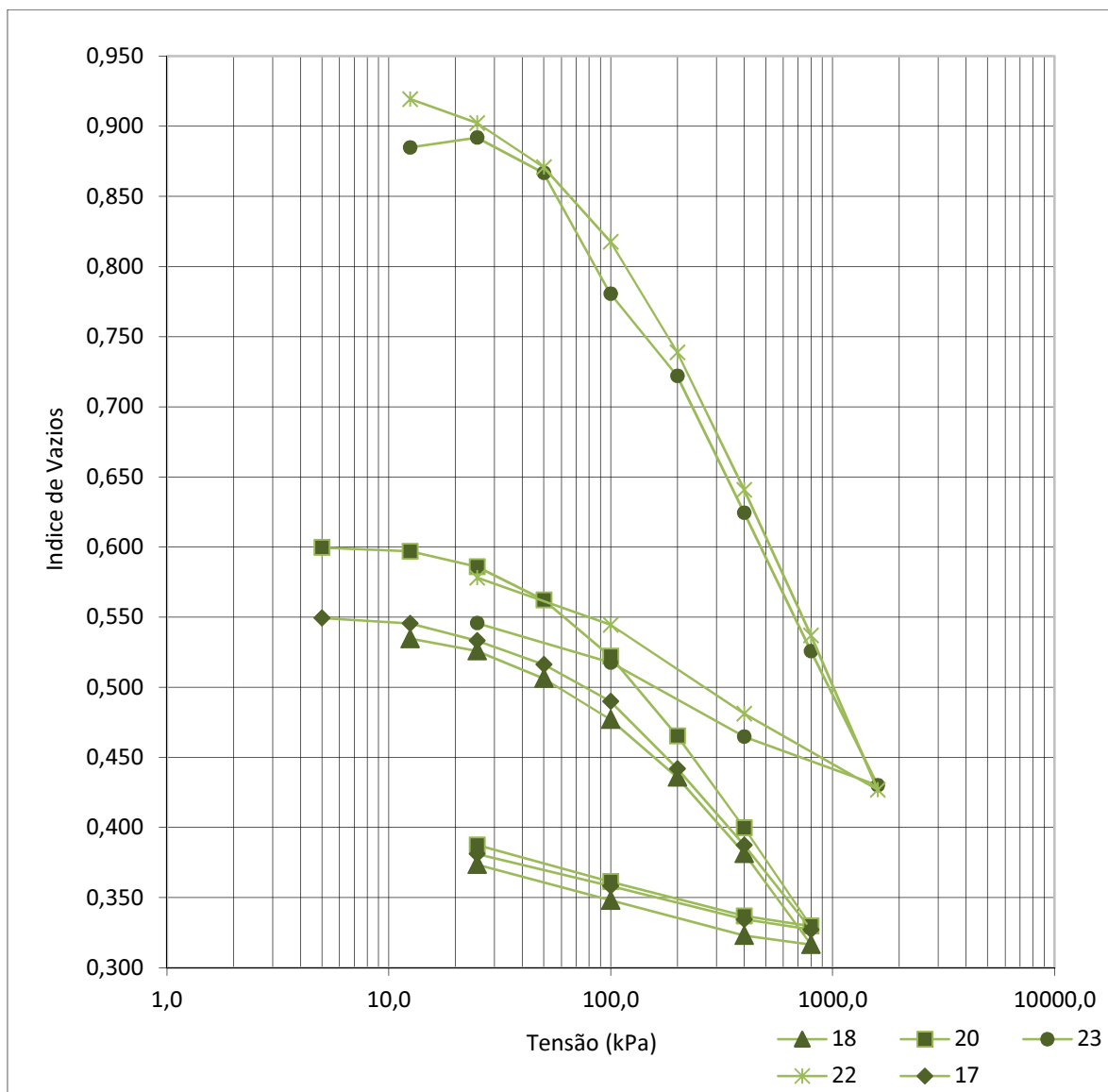


Figura 4.15 - Diagrama da variação da tensão efetiva vertical *versus* índice de vazios, para os cinco ensaios realizados

A tabela 4.20 reproduz o resumo dos parâmetros obtidos nos 5 ensaios edométricos realizados, não tendo sido possível a realização deste ensaio nas restantes amostras por constrangimentos de amostragem.

Tabela 4.20 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios edométricos realizados em amostras dos barros de Beja

Edométrico				
Grandezas	máximo	mínimo	média	desvio padrão
w (%)	34,20	19,40	25,24	5,78
γ (kN/m ³)	28,10	21,70	27,70	0,49
γ_i (kN/m ³)	21,80	19,50	20,70	1,02
h_0 (cm)	1,30	1,00	1,20	0,13
e_0	0,90	0,50	0,70	0,17
S (%)	115,90	91,00	101,36	8,36
C_c^*	0,34	0,17	0,25	0,07
C_r	0,08	0,04	0,05	0,01

*Para tensões entre 100 e 800 kPa

Os parâmetros apresentados definem as relações tensão-deformação no solo e permitem avaliar a resposta deste aos carregamentos externos impostos, e os assentamentos provocados. Os índices de compressibilidade e recompressibilidade obtidos encontram-se dentro dos valores expectáveis para argilas e encontram-se próximos da relação de C_r ser cerca de 1/5 de C_c (Fernandes, 2006).

A tabela 4.21 representa os resultados obtidos para os coeficientes de compressibilidade e compressibilidade volumétrica, o coeficiente de consolidação e o coeficiente de permeabilidade obtidos do ensaio edométrico, para os escalões de tensão de 200, 400, 800 e 1600 kPa. O módulo de deformabilidade volumétrica do solo (E_{oed}) ou módulo edométrico do solo, pode assumir-se como um módulo de Young confinado (unidimensional). A determinação do módulo edométrico em função do escalão de tensão aplicado regista uma relação direta entre ambos, quanto maior o escalão de carga maior o módulo edométrico, e ilustra o comportamento não linear dos solos em função da deformação.

Tabela 4.21 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios edométricos em provetes dos barros de Beja para os últimos escalões de carregamento.

Amostras nº	carga (kg)	σ (kPa)	e_0	$a_v (10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN})$	$m_v (10^{-3} \text{ m}^2/\text{kN})$	E_{oed} (MPa)	C_v (m^2/ano)	$k (10^{-10} \text{ m/s})$
17	4	200	0,44	0,48	0,33	3,00	2,30	2,43
	8	400	0,39	0,27	0,20	5,07	0,86	0,54
	16	800	0,33	0,15	0,11	8,81	0,32	0,12
18	4	200	0,44	0,41	0,29	3,49	4,76	4,32
	8	400	0,38	0,27	0,20	5,08	1,40	0,88
	16	800	0,32	0,16	0,12	8,08	0,50	0,20
20	4	200	0,47	0,57	0,39	2,58	7,63	9,37
	8	400	0,40	0,33	0,23	4,27	3,25	2,43
	16	800	0,33	0,18	0,13	7,60	2,09	0,88
22	4	200	0,74	0,79	0,45	2,20	0,93	1,34
	8	400	0,64	0,49	0,30	3,34	0,57	0,54
	16	800	0,54	0,21	0,13	7,46	0,23	0,12
	32	1600	0,43	0,14	0,10	10,34	0,26	0,08
23	4	200	0,72	0,59	0,34	2,94	1,28	1,38
	8	400	0,62	0,49	0,30	3,33	0,61	0,59
	16	800	0,53	0,25	0,16	6,18	0,33	0,17
	32	1600	0,43	0,12	0,08	11,92	0,17	0,05

b) Ensaio de corte direto

Como referido em 3.2.2.2b), ensaio de resistência ao corte direto foi realizado simulando as condições mais adversas para as situações *in situ* destas amostras: ensaio não consolidado, não drenado. Foram ensaiadas as amostras número 20, 22 e 23. O esquema de cargas foi de 2, 4, 8 e, na amostra 20, 16 kg; a velocidade de deslocação da semi-caixa foi sempre de 0,8 mm/min, a fim de garantir um ensaio não drenado. Todas as amostras romperam para deslocamentos da ordem de 9 mm. Ilustram-se, na tabela 4.22, os resultados obtidos para a amostra 20.

Tabela 4.22 – Resumo dos parâmetros de realização do ensaio de corte, exemplo da amostra 20

Ensaio n.º		1	3	5
Fase inicial	Largura (cm)	2,0	2,0	2,0
	Altura (cm)	6,0	6,0	6,0
	Volume (cm ³)	72,0	72,0	72,0
	Teor em água (%)	35,4	36,3	34,1
	Massa volúmica seca (g/cm ³)	1,35	1,35	1,43
	Tensão normal (kPa)	54,5	109,0	436,0
Fim do ensaio	Teor em água (%)	39,7	40,2	36,5
Fase de corte	Velocidade de corte (mm/min)	0,8	0,8	0,8
	Tempo de rotura (s)	700	730	730
	Força de corte (N)	215,6	234,0	224,7
	Tensão de corte na rotura (kPa)	66,2	76,5	73,4

A figura 4.16 representa os gráficos obtidos para as três amostras ensaiadas. Ao invés do ensaio edométrico, não se verificou tão significativamente neste ensaio que as amostras 22 e 23 formassem um grupo com características muito distintas da amostra 20. Todas as amostras demonstram um comportamento consonante com a modalidade de ensaio adotada: evidenciam apenas resistência ao corte não drenada (c_u), devido ao facto dos ensaios serem não consolidados, que se situa próxima de 70, 41 e 55 kPa respetivamente para as amostras 20, 22 e 23. Este facto é sublinhado pelos valores obtidos para os ângulos de atrito, respetivamente de 0,5°, 4° e 2°, que se assumem desprezáveis.

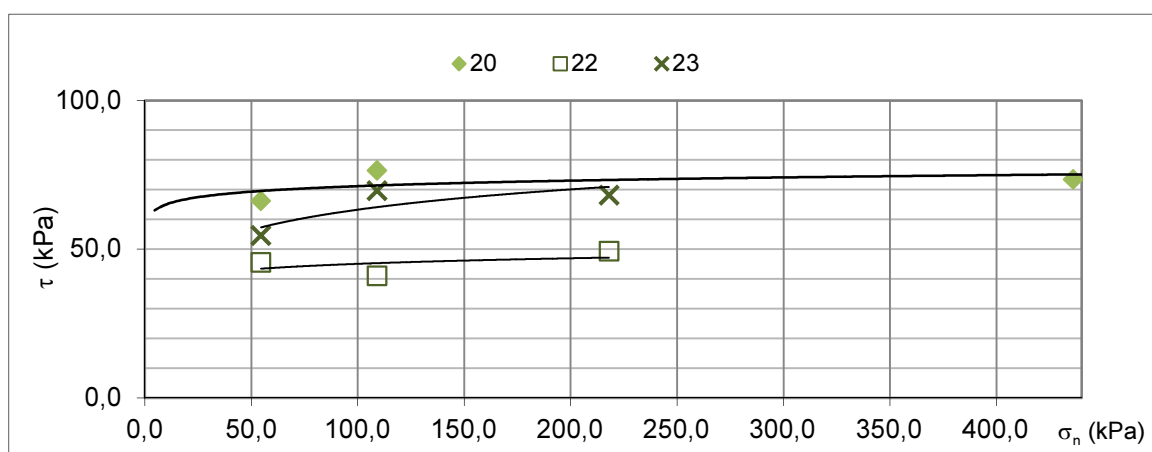


Figura 4.16 – Gráfico relativo ao ensaio de corte direto, com a projeção das 3 amostras ensaiadas

Embora se tenham realizado vários ensaios, os mesmos não foram considerados ora por dificuldades de montagem de provetes ora por os valores obtidos não parecerem coerentes. Assim, e com as

devidas reservas pelo facto de só se ter conseguido obter um total de três amostras completas, considera-se que os barros de Beja deverão apresentar resistências ao corte não drenadas inferiores a 80 kPa para teores em água a rondar 30-40%.

c) Ensaio de expansibilidade

Como referido no capítulo 3, recorreu-se ainda ao equipamento do ensaio edométrico para realizar ensaios para avaliar a expansibilidade vertical livre destes solos mais finos ricos em esmectites. Os resultados obtidos estão sintetizados na tabela 4.23.

As diferenças ilustradas nos valores da altura inicial da amostra (h_0) devem-se ao facto de, ao princípio, se terem ensaiado amostras com altura inferior à do anel edométrico, no sentido de garantir expansibilidade vertical, confinada lateralmente (Head, 1982), figura 4.17.

Tabela 4.23 - Resultados finais dos valores obtidos nos ensaios de expansibilidade vertical livre, para os barros de Beja

Amostra nº	h_0 (cm)	G_s	e	w (%)	S (%)	massa (kg)	σ (kPa)	Δh (10^{-3} cm)	exp (%)
18	1,32	2,71	0,40	21,7	148,4	0,25	12,5	-1,9	-0,14
	1,32	2,71	0,49	21,5	118,7	0,5	25,0	-6,9	-0,52
20	1,33	2,81	0,64	22,9	100,1	0	0,0	8,2	0,62
	1,31	2,81	0,62	20,9	94,4	0,25	12,5	-3,6	-0,27
22	1,30	2,81	0,85	32,9	108,8	0	0,0	31,1	2,39
	1,30	2,81	0,87	34,5	111,7	0,05	2,5	7,7	0,59
	1,30	2,81	0,90	36,1	113,5	0,1	5,0	4	0,31
	1,32	2,81	1,14	34,3	121,0	0,15	7,5	6,1	0,46
	1,30	2,81	0,99	39,2	111,7	0,25	12,5	-4,5	-0,35
23	2,00	2,81	0,80	27,7	97,1	0	0,0	16,8	0,84
	1,99	2,81	0,87	29,8	95,9	0,05	2,5	6,2	0,31
	1,99	2,81	0,88	29,9	95,6	0,1	5,0	3,7	0,19
	1,89	2,81	0,77	28,6	104,6	0,2	10,0	4	0,21

Complementando o descrito em 3.2.2.2c) analisam-se aqui os resultados de todas as amostras e dos parâmetros obtidos, evidenciando a seleção das tensões aplicadas e as técnicas utilizadas. Na coluna relativa à expansibilidade (exp), os valores negativos correspondem a assentamentos e os positivos à expansibilidade livre. A deformabilidade (Δh) representa a diferença entre a leitura inicial do deflectómetro e a sua leitura final, correspondendo assim ao assentamento ou empolamento livre, pelo que nos casos em que ocorre assentamento o valor obtido é negativo. A coluna Exp representa

o quociente entre a deformabilidade e a altura inicial da amostra (h_0), ilustrando a percentagem de expansibilidade obtida pela amostra para os diferentes escalões de carga. A decisão de se adotarem carregamentos no intervalo entre o primeiro e terceiro escalão de cargas do edométrico, ou seja entre 0 e cerca de 25 kPa, veio a verificar-se acertada, como explícito na tabela acima, onde a expansibilidade livre ocorre para valores de carregamento abaixo dos 12,5 kPa, correspondente ao segundo escalão de carga do ensaio edométrico.



Figura 4.17 – Encamisamento de provete de barros para ensaio de expansibilidade com redução da respetiva altura inicial

As figuras 4.18 e 4.19 exemplificam os resultados obtidos com representação gráfica. A figura 4.18 representa a variação da espessura da amostra 22 ao longo das 72 horas de realização do ensaio, em função das cargas aplicadas. Verifica-se que, independentemente da tensão aplicada, os valores máximos se obtêm nas primeiras 24 a 48 horas de ensaio, seguindo-se uma expansibilidade muito mais moderada até à estabilização ao fim das 72 horas.

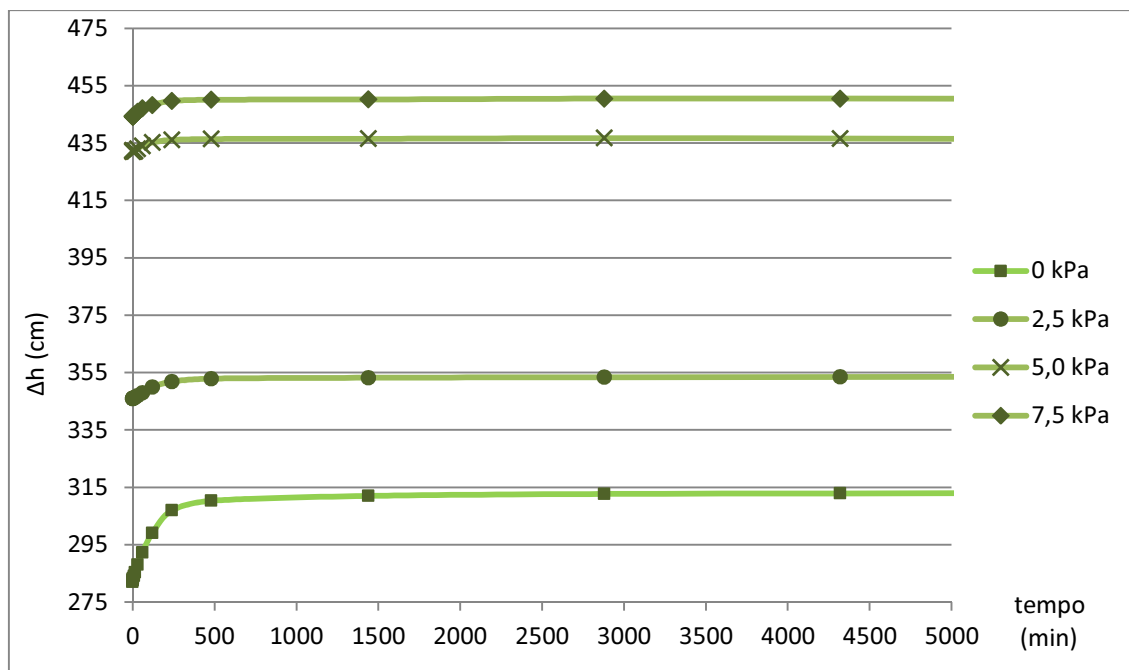


Figura 4.18 – Exemplo dos resultados obtidos para a variação da expansibilidade livre até 7,5 kPa de carga, ao longo das 72 h de duração do ensaio, para a amostra 22

A figura 4.19 representa o gráfico da expansibilidade em função da tensão aplicada, construído com os valores obtidos para cada escalão de carga, demonstrando que a expansibilidade é maior para escalões de carga menores, embora não tenha sido possível estabelecer uma relação direta entre a expansibilidade e o carregamento.

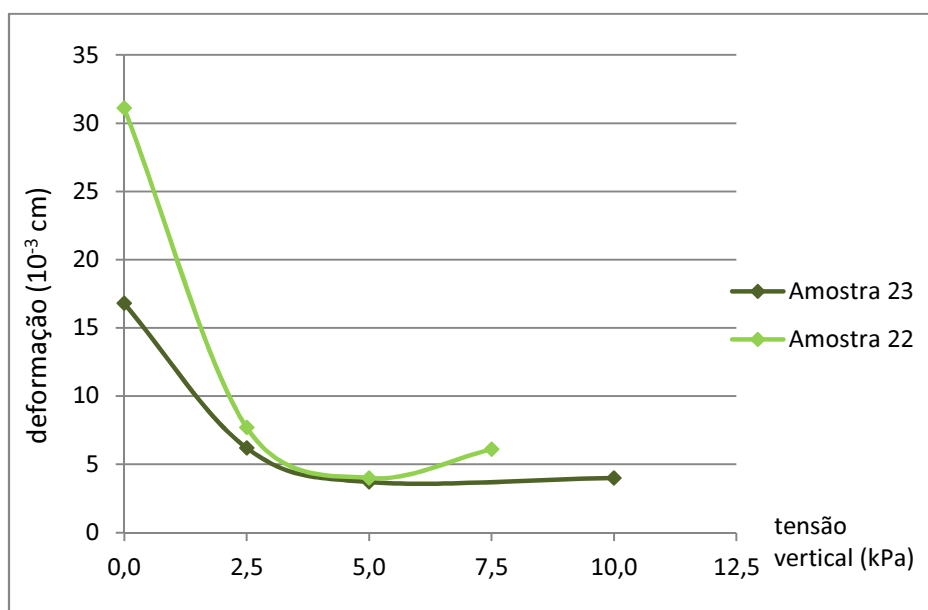


Figura 4.19 – Exemplo da variação da deformação (expansibilidade) em função da tensão vertical aplicada

De acrescentar que os valores obtidos, em laboratório, para a expansibilidade são meramente indicativos e que a extrapolação para os valores de campo deve ser cautelosa dado que as variações de granulometria, composição química, teor em água ou permeabilidade influenciam os valores a obter.

4.3.3 Comentário aos resultados obtidos em solos residuais

Pretende-se nesta secção relacionar os resultados obtidos para os diferentes parâmetros geotécnicos dos solos residuais, recorrendo a formas de visualização gráficas.

No que diz respeito ao teor em água natural com que as amostras foram colhidas, pode verificar-se (figura 4.20) que as amostras do saprólito revelavam valores mais baixos do que as dos barros de Beja. A este facto não é alheia a composição mineralógica e granulométrica dominante nestes solos. Os barros de Beja, pela sua natureza argilosa, só permitiam a sua recolha e talhe de blocos, num estado mais plástico logo com teor em água necessariamente superior ao do saprólito. Enquanto que as amostras de saprólito, puderam ser recolhidas em estação seca, o mesmo não se passou com as amostras de barros de Beja, que necessitaram de épocas de precipitação (outono e inverno) para que a sua recolha se pudesse concretizar e especialmente obter amostras indeformadas.

A análise da figura 4.21 permite inferir que relativamente à densidade da partículas, os valores obtidos para ambos os tipos de solos, se distribuem de forma bastante homogênea.

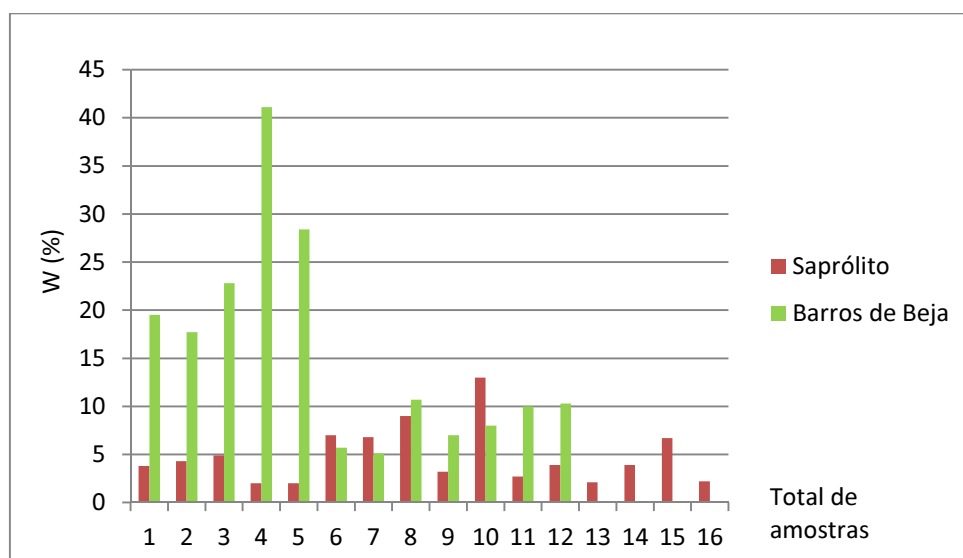


Figura 4.20 - Comparação entre os valores do teor em água natural dos dois tipos de solos

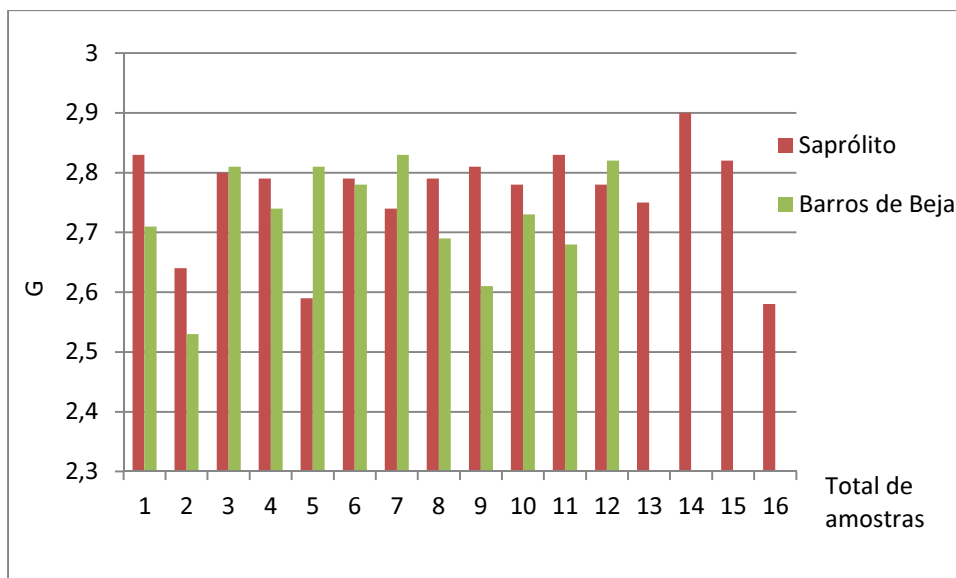


Figura 4.21 - Comparação entre os valores obtidos para a densidade das partículas dos dois tipos de solos

Para o caso dos limites de consistência, retração linear e índice de plasticidade (figuras 4.22 a 4.24), e como seria de esperar, os valores obtidos para o saprólito encontram-se sempre numa gama mais baixa do que os obtidos para os barros de Beja. Estes resultados encontram-se dentro do que seria expectável dada a percentagem e natureza do material fino presente em ambos os solos.

O valor máximo registado para o limite de liquidez dos barros de Beja foi de 68%, enquanto que o máximo do saprólito se fica pelos 42% - figura 4.22. Quanto ao índice de plasticidade, o valor máximo obtido para os barros de Beja é de 29% e para o saprólito de apenas 14% - figura 4.23, sendo assim o I_p dos barros sempre superior ao do saprólito.

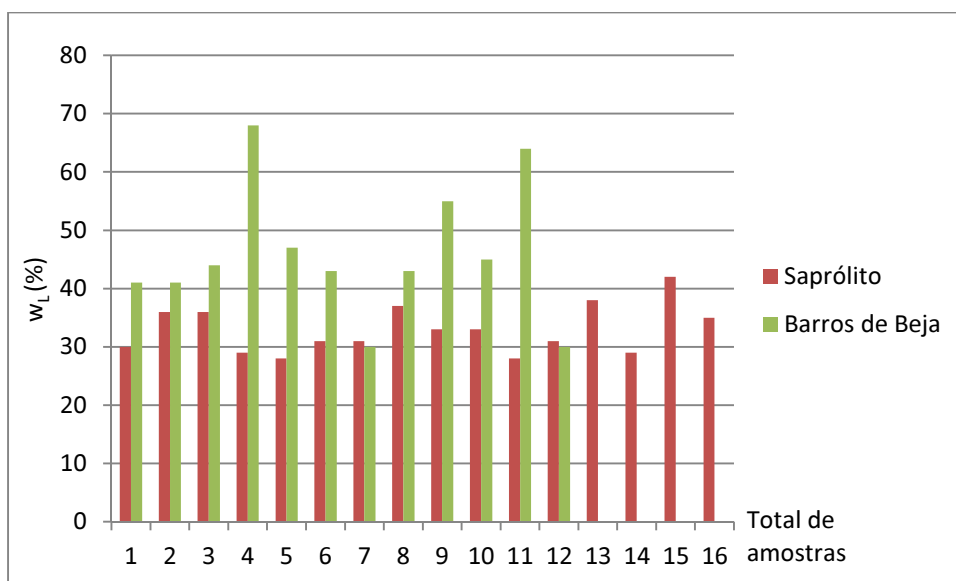


Figura 4.22 - Comparação entre os valores obtidos para o limite de liquidez dos dois tipos de solos

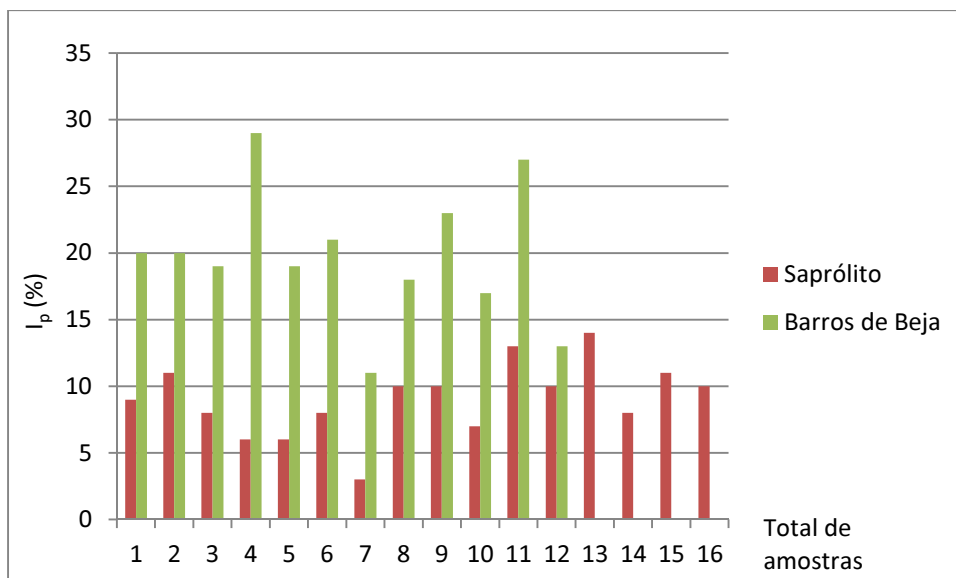


Figura 4.23 - Comparação entre os valores obtidos para o índice de plasticidade dos dois tipos de solos

As figuras 4.24 e 4.25 ilustram claramente as diferenças obtidas para a retração linear do saprólito e dos barros de Beja. Como seria de esperar, devido à composição mineralógica, a retração linear para os barros de Beja é quase dupla, atingindo valores máximos de 18% e ficando o saprólito pelo máximo de 9%.

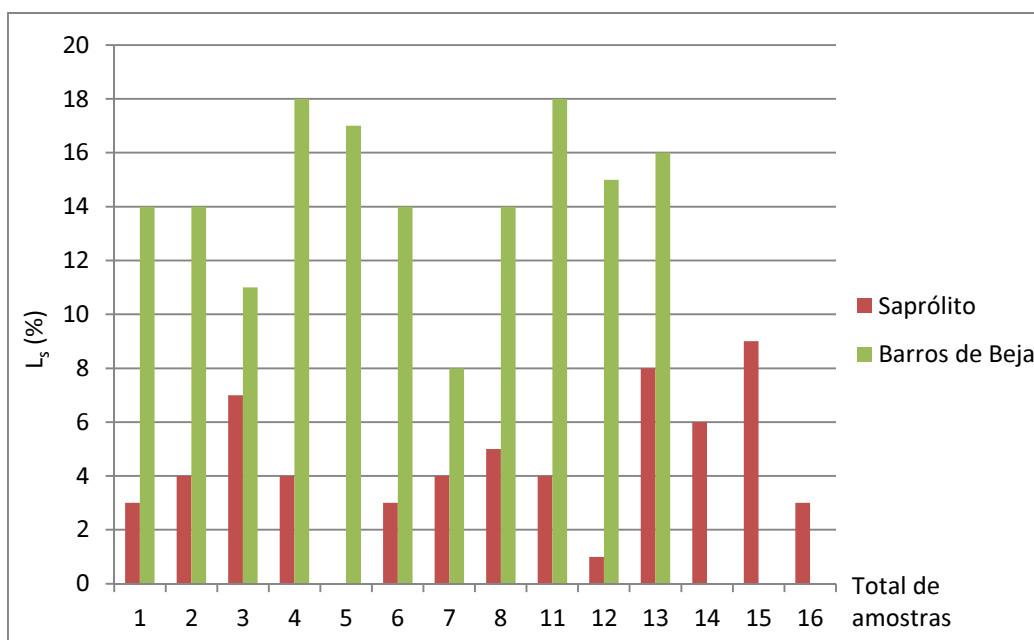


Figura 4.24 – Comparação entre os valores para a retração linear dos dois tipos de solos

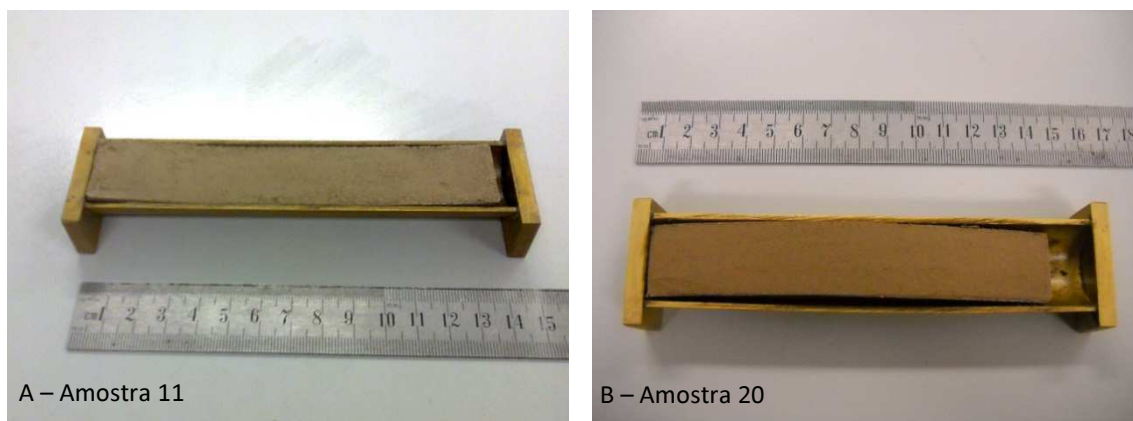


Figura 4.25 - Comparação entre a retração linear do saprólito (A) e dos barros de Beja (B)

4.3.4 Correlações entre propriedades dos solos

Na presente secção estimam-se algumas das correlações mais usuais e de maior interesse na identificação geotécnica de solos, individualmente para o saprólito e para os barros de Beja.

A correlação entre o limite de liquidez e o índice de plasticidade revela ser pior no caso dos saprólitos (figura 4.26), com um coeficiente de determinação de 0,2, do que no caso dos barros de Beja (figura 4.27), em que a dispersão é menor dado que o seu coeficiente de determinação é de 0,9, obtendo-se portanto neste caso uma correlação válida. A projeção destes valores na carta de plasticidade de Casagrande (figura 4.28), revela para o saprólito uma predominância de material fino classificado como CL, argila magra, a ML, silte, enquanto que para os barros de Beja, onde a fração fina é predominante, os mesmos se classificam como CL, argila magra a MH, silte elástico. Estes dados resultam do facto dos barros de Beja registarem no geral valores mais elevados para os limites de consistência do que o saprólito.

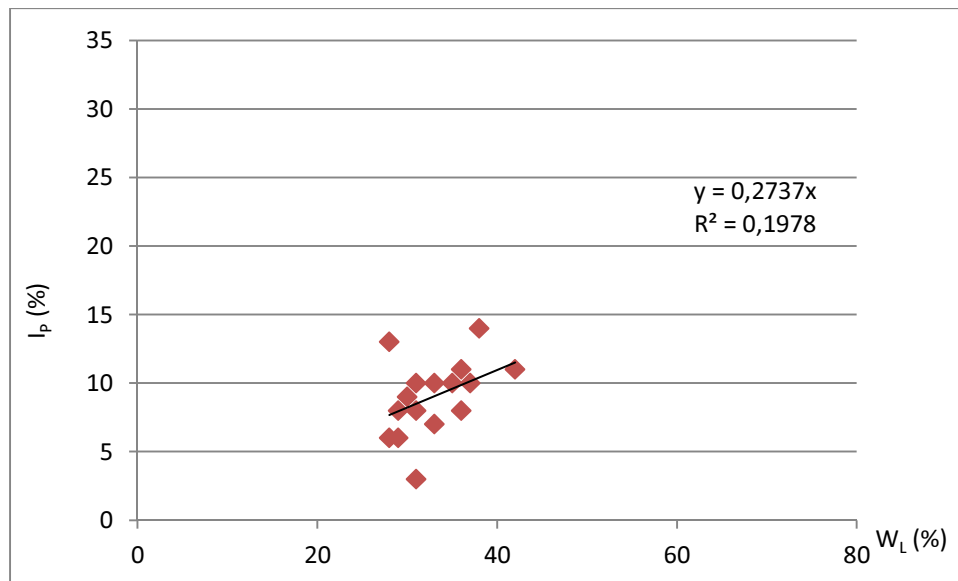


Figura 4.26 – Correlação entre o limite de liquidez e o índice de plasticidade para o saprólito

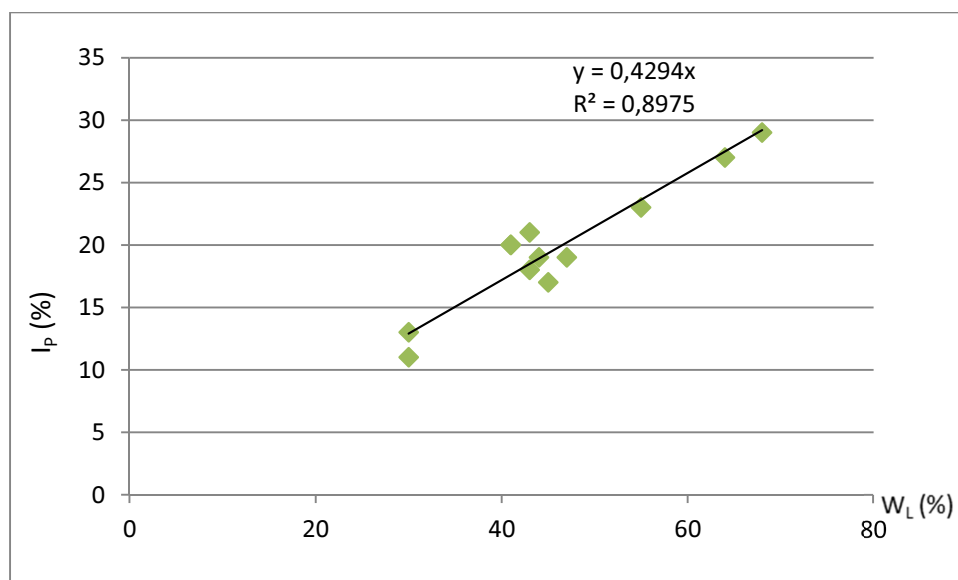


Figura 4.27 – Correlação entre o limite de liquidez e o índice de plasticidade para os barros de Beja

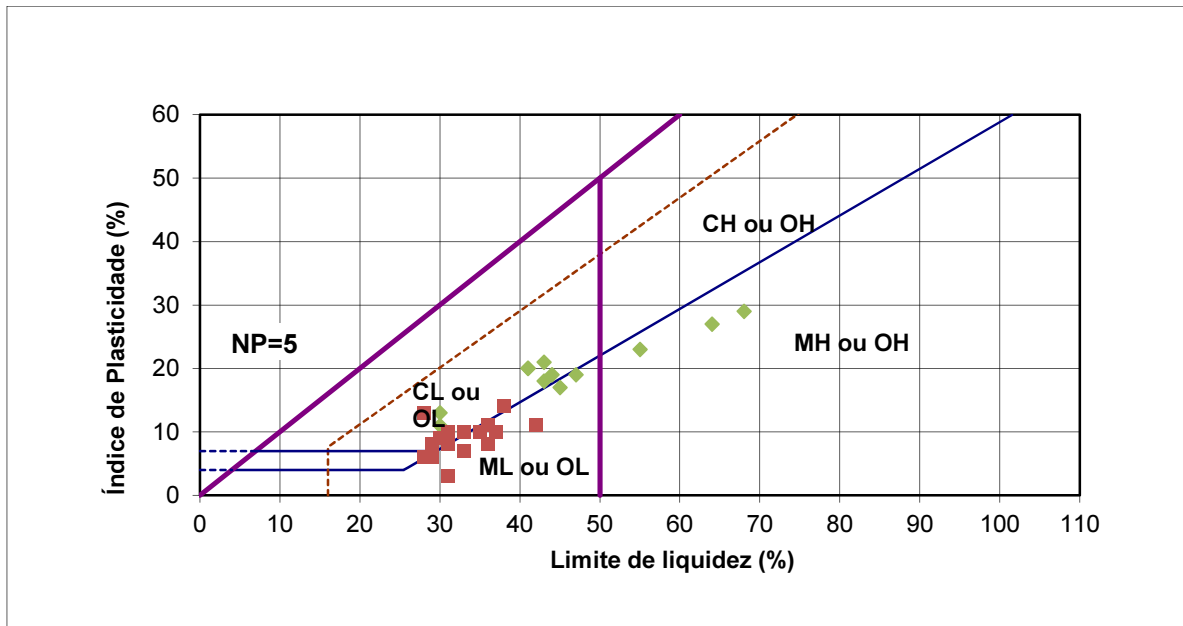


Figura 4.28 – Projeção, na carta de plasticidade de Casagrande, dos valores registados para o saprólito (a bordeaux) e para os barros de Beja (a verde)

A correlação entre a percentagem de argila presente no solo e o índice de plasticidade permite classificar a fração argila no que diz respeito aos minerais presentes. Numa primeira análise pode observar-se a correlação existente no caso dos barros, com coeficiente de determinação de 0,7 (figura 4.29) e, como seria de esperar a não existência de correlação para o saprólito – figura 4.30.

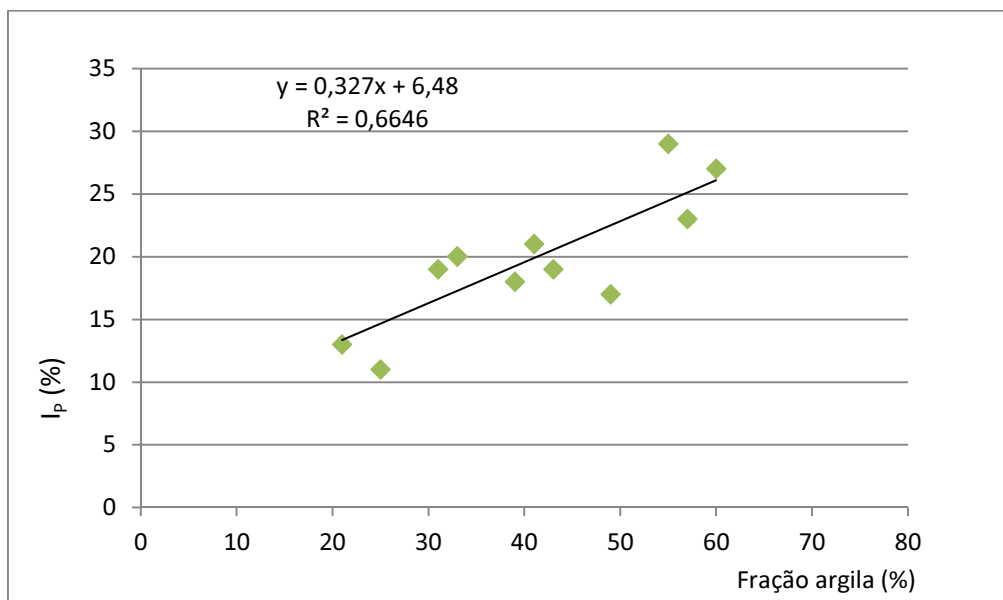


Figura 4.29 – Correlação entre a fração argila e o índice de plasticidade para os barros de Beja

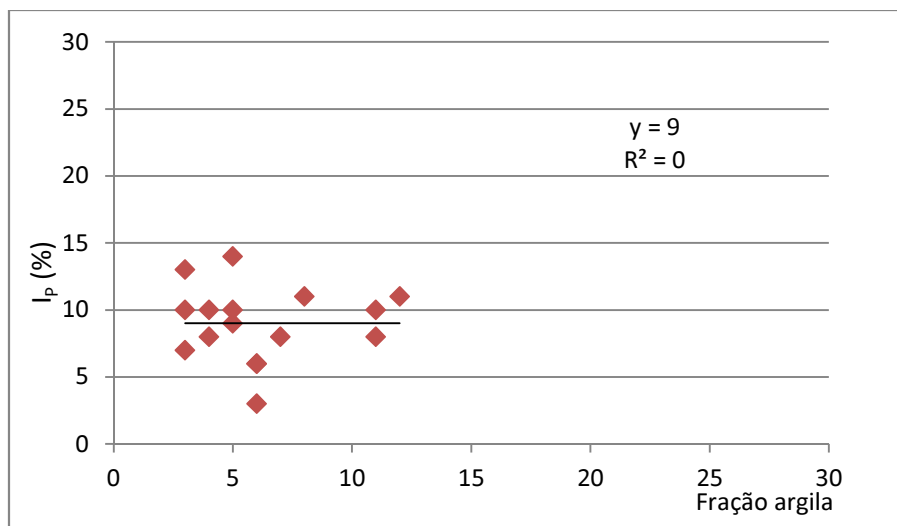


Figura 4.30 – Correlação entre a fração argila e o índice de plasticidade para o saprólito

A projeção dos valores de ambos os solos no gráfico que classifica o tipo de mineral argiloso em função da sua relação I_p / fração argila (figura 4.31), demonstra que os minerais de argila presentes no saprólito têm um comportamento próximo da caulinite, e os minerais de argila presentes nos barros de Beja não evidenciam comportamento próximo ao da montmorilonite, como seria de esperar pela DRX, mas mais semelhante ao da ilite-caulinite, justificando os valores obtidos para os limites de consistência terem ficado aquém do esperado para este tipo de solo e a existência de uma estrutura interestratificada nos minerais de argila.

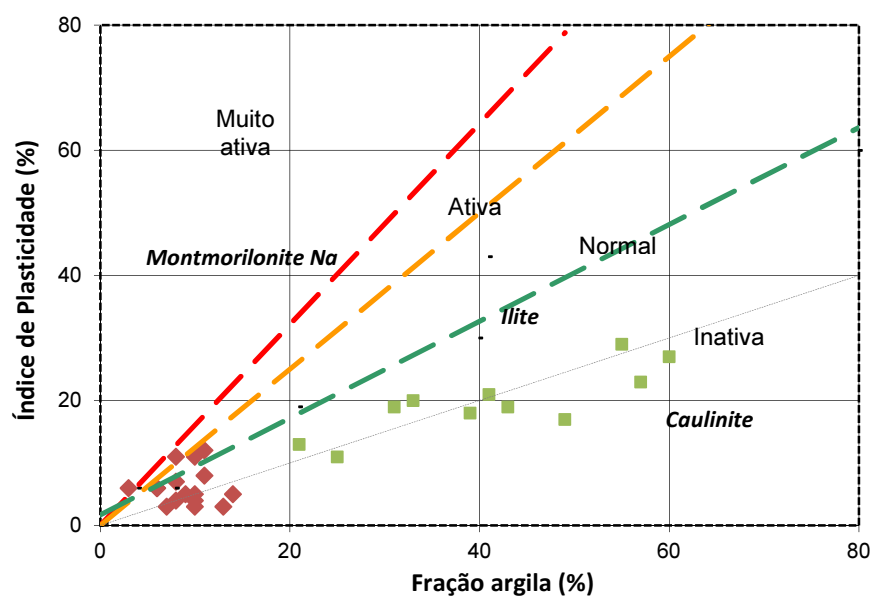


Figura 4.31 – Posição das amostras de barros de Beja (a verde) e do saprólito (a bordeaux), no gráfico de correlação entre a fração argila e o índice de plasticidade para os barros de Beja, segundo Skempton, modificado de (Silva, 2003)

A correlação entre o índice de plasticidade e o limite de retração linear obtém mais uma vez coeficientes de determinação piores para o saprólito (figura 4.32), de 0,1, do que para os barros de Beja (figura 4.33), com um valor de 0,6. A dispersão assinalada no conjunto de amostras dos barros de Beja tem como origem o facto de se ter verificado que algumas amostras exibiam uma retração linear elevada, 18%, e outras uma próxima da do saprólito, evidência que se pode explicar pelas diferenças mineralógicas da fração argila, ora mais próxima da montmorilonite ora da ilite.

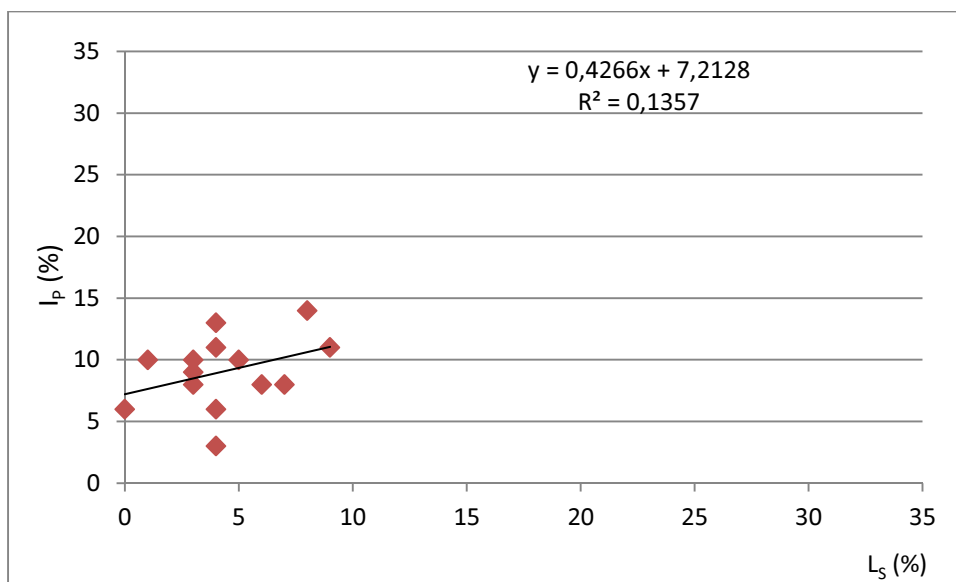


Figura 4.32 – Correlação entre o limite de retração linear e o índice de plasticidade para o saprólito

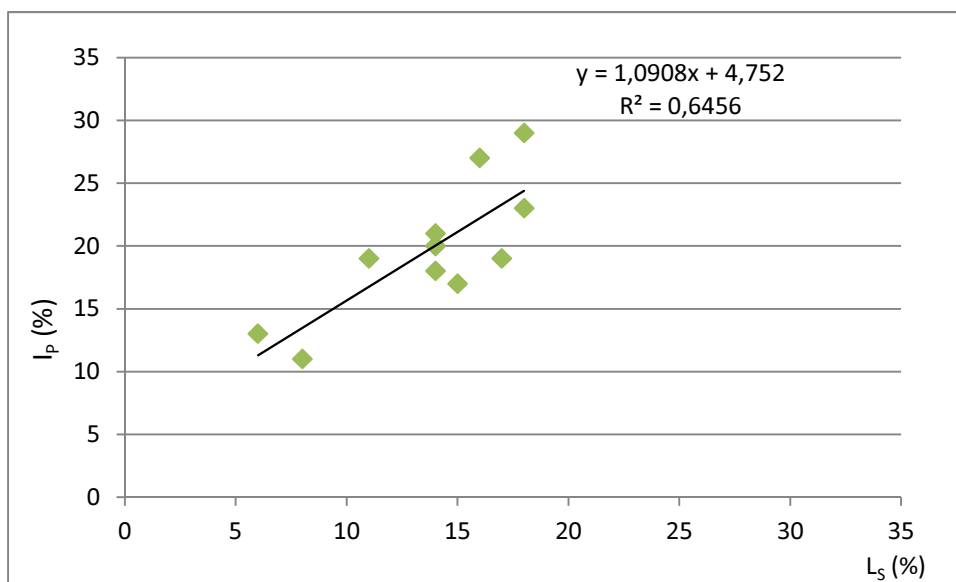


Figura 4.33 – Correlação entre o limite de retração linear e o índice de plasticidade para os barros de Beja

Outra das correlações que se realizou utilizou a proposta de (Terzaghi *et al.*, 1996), que relaciona empiricamente, para solos normalmente consolidados, o índice de compressibilidade (C_c) com o limite de liquidez (w_L), obtendo a expressão

$$C_c = 0,009 * (w_L - 10) \quad (4.1)$$

Com os resultados obtidos para as cinco amostras ensaiadas para a compressibilidade e os respetivos valores de limite de liquidez, construiu-se o gráfico da figura 4.34 do qual se retira a correlação:

$$C_c = 0,006 * (w_L - 4) \quad (4.2)$$

Deve no entanto salientar-se que muito embora o coeficiente de determinação obtido seja de 0,6, o número de amostras utilizadas é bastante reduzido.

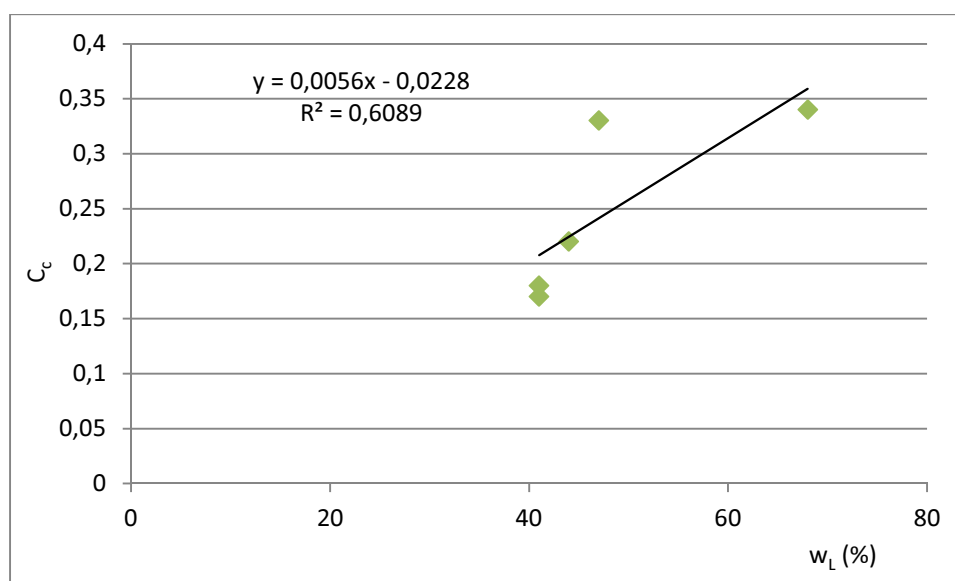


Figura 4.34 – Correlação entre o índice de compressibilidade e o limite de liquidez para os barros de Beja

4.4 Ensaaios em rocha

Apresentam-se seguidamente os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos gabros, como rocha intacta, divididos entre a determinação das suas propriedades intrínsecas ou físicas e das propriedades mecânicas.

Os ensaios a seguir descritos foram realizados em provetes regulares, na sua maioria cilíndricos, e apenas os ensaios de compressão pontual utilizaram amostras irregulares. A geometria dos provetes ensaiados encontra-se descrita no anexo IV.

4.4.1 Propriedades físicas

a) Peso volúmico e porosidade aparente

Encontram-se na tabela 4.24 os resultados para as propriedades físicas: peso volúmico aparente, γ , e porosidade efetiva, P_e , realizados em cerca de 40 provetes.

Tabela 4.24 - Resumo dos resultados dos ensaios de peso volúmico e porosidade, realizados nas amostras 31 e 32 (Gomes, 2011)

Amostra nº	γ (kN/m ³)				P_e (%)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	29,0	28,4	28,69	0,13	0,40	0,04	0,15	0,08
32 (W ₁)	29,74	28,0	28,61	0,59	0,35	0,1	0,23	0,09
32 (W ₂)	29,09	28,41	28,69	0,20	0,72	0,26	0,45	0,14

Os valores obtidos são concordantes com os referidos na bibliografia - confrontar tabelas 1.5, 1.6 e 1.9, revelando um peso volúmico elevado e uma porosidade baixa (<1%), mesmo nas amostras ligeiramente meteorizadas (W₂), como seria de esperar numa rocha densa como o gabro. Este facto é sublinhado pelos baixos desvios padrão obtidos.

b) Teor em água

O teor em água é uma propriedade intrínseca da rocha e foi determinada no sentido de se poder avaliar a sua influência nos diversos ensaios, foram inclusivamente efetuados ensaios com provetes saturados para comparação da influência do comportamento mecânico e dinâmico, tendo-se verificado que, como seria de esperar face à baixa porosidade destas rochas, o teor em água manteve-se sempre próximo dos 0% e não influenciou os resultados mecânicos ou dinâmicos (Gomes, 2011).

Pela análise da tabela 4.25 pode constatar-se o reduzido teor em água que os seis provetes de cada conjunto de amostras ensaiadas revelaram.

Tabela 4.25 - Resumo dos resultados dos ensaios de determinação do teor em água, realizados nas amostras 31 e 32 (Gomes, 2011)

Amostra nº	w (%)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	0,0006	0,0003	0,0005	0,0001
32 (W ₁)	0,0025	0,0006	0,0012	0,0001
32 (W ₂)	0,0019	0,0006	0,0012	0,0005

4.4.2 Propriedades dinâmicas

Inicia-se esta descrição pelos resultados referentes à determinação das velocidades de propagação das ondas sísmicas nos gabros, correspondentes aos ensaios efetuados em 36 provetes cilíndricos, todos eles ulteriormente submetidos a ensaios de compressão não confinados. A tabela 4.26 resume os valores obtidos para as velocidades de propagação das ondas P (V_p) e S (V_s), e a tabela 4.27 os resultados calculados para os parâmetros elásticos dinâmicos, coeficiente de Poisson (ν_d) e módulo de elasticidade (E_d).

Tabela 4.26 - Resumo dos resultados de velocidades dos ensaios de ultrassons realizados (Gomes, 2011)

Amostra	V_p (m/s)				V_s (m/s)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	7013	6643	6885	98,37	4407	3955	4193	97,12
32 (W ₁)	6900	6665	6767	69,68	4394	3886	4149	152,68
32 (W ₂)	6862	6227	6549	202,14	4271	3944	4120	117,76

Os valores registados para V_p e V_s , situados, respetivamente, entre 6220 e 7010 m/s e 3940 e 4410 m/s, encontram-se dentro dos padrões esperados e indicados na bibliografia consultada e resumida nas tabelas 1.5 e 1.7. Os valores obtidos para os provetes da amostra 32 (W₂), ligeiramente meteorizada, não se evidenciam muito diferentes dos obtidos para a rocha sã; contudo e como seria de esperar, apresentam-se muito distantes dos valores médios para rocha muito meteorizada (W₄) apresentados na tabela 1.7 por (Ez Eldin *et al.*, 2007a), de 2370m/s. Para as ondas P, este material ligeiramente meteorizado apresenta uma maior dispersão, quase dupla da obtida para os provetes de rocha sã; de facto e embora existam fraturas nos provetes desta amostra 32 (W₂), estas estão cimentadas e, portanto, a sua influência faz-se sentir na dispersão dos resultados obtidos, mas não nos valores médios de velocidade de propagação obtidos. No caso da velocidade de propagação das

ondas S essa influência é menor, uma vez que se tratam de ondas diretas medidas não no eixo, mas mais na zona lateral do provete, evitando eventualmente a influência de algumas fraturas.

Tabela 4.27 - Resumo dos resultados calculados para os parâmetros elásticos dinâmicos (Gomes, 2011)

Amostra	v_d				E_d (GPa)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	0,20	0,11	0,16	0,02	130	111	123	4,12
32 (W ₁)	0,22	0,09	0,15	0,04	128	112	120	5,82
32 (W ₂)	0,18	0,06	0,13	0,04	128	111	116	5,56

Os valores da tabela 4.27 confirmam a fraca distinção entre os valores médios obtidos, quer para a rocha sã, quer para a ligeiramente alterada e com fraturas cimentadas. Os valores médios para o módulo de elasticidade dinâmico sublinham tratar-se também de uma rocha de qualidade muito boa. Os valores médios do coeficiente de Poisson dinâmico classificam-se como baixos segundo os valores típicos para esta grandeza definidos por (Gercek, 2007) – intervalo 0,1 a 0,2, reforçando novamente a qualidade muito boa dos gabros.

4.4.3 Propriedades mecânicas e de deformabilidade

Os próximos resultados a serem introduzidos referem-se a parâmetros de resistência e correspondem a ensaios de determinação do ângulo de atrito básico das discontinuidades, dureza ao ressalto, resistência à compressão pontual (Is_{50}), tração indireta ou ensaio de tração brasileiro (σ_t), e ensaios de resistência à compressão uniaxial (σ_c), com determinação dos módulos de deformabilidade tangente e secante.

a) Ângulo de atrito básico

Os resultados obtidos para os ensaios de determinação do ângulo de atrito básico da rocha (*tilt test*), em 58 provetes da amostra 31 e 36 provetes da amostra 32, encontram-se representados na tabela 4.28.

Tabela 4.28 - Resumo dos resultados dos ensaios de determinação do ângulo de atrito básico

Amostra	ϕ_b (°)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	41	22	33	5,25
32	42	27	31	2,69

Os valores médios verificados, de 31° e 33°, aproximam-se do valor de 35°, referido por (Vallejo & Ferrer, 2011) para o ângulo de atrito dos gabros. Verifica-se que o desvio padrão obtido é baixo, sendo inferior para as amostras do grupo 32, cuja face lateral se apresentava mais homogênea.

b) Dureza ao ressalto

O ensaio de dureza ao ressalto foi realizado em 7 blocos, no caso das amostras 31 e 32, num único bloco da amostra 34 e em 2 blocos da amostra 35.

Tabela 4.29 - Resumo dos resultados dos ensaios de dureza ao ressalto realizados nas várias amostras

Amostra	Dureza ao ressalto (R_L)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	59	53	56	1,66
	59	50	54	2,78
	62	47	54	3,35
	51	25	39	7,68
	58	24	40	8,55
	72	53	62	4,82
	64	29	55	9,96
32 (W_1)	69	59	63	4,71
	67	54	59	3,35
	68	46	61	5,42
	56	26	42	9,05
	58	24	40	8,55
	72	53	62	4,82
	64	29	55	9,96
34	63	57	60	1,69
35	50	32	45	5,34
	20	11	14	2,45

Pelos resultados da tabela 4.29 concluiu-se que, na generalidade dos blocos ensaiados com o martelo de Schmidt do tipo L, os valores para a dureza ao ressalto são elevados, revelando uma rocha de resistência elevada. Na amostra 35, o segundo grupo de ensaios revela uma rocha de qualidade mais fraca (Aydin, 2008), justificando que a meteorização é um dos fatores que influenciam os resultados deste ensaio, dado que este grupo se encontrava moderadamente meteorizado (W_3).

A figura 4.35 ilustra a relação entre os valores médios obtidos para cada zona amostrada. Note-se que, de acordo com a norma de realização do ensaio (Aydin, 2008), cada grupo de valores corresponde ao tratamento de pelo menos vinte medições efetuadas, das quais se desprezam os dez mais baixos de acordo com as recomendações da ISRM. Os resultados obtidos revelam por vezes alguma dispersão mais significativa, relativamente ao valor médio, rondando os 20%, mas tal não é de surpreender tratando-se de um ensaio expedito.

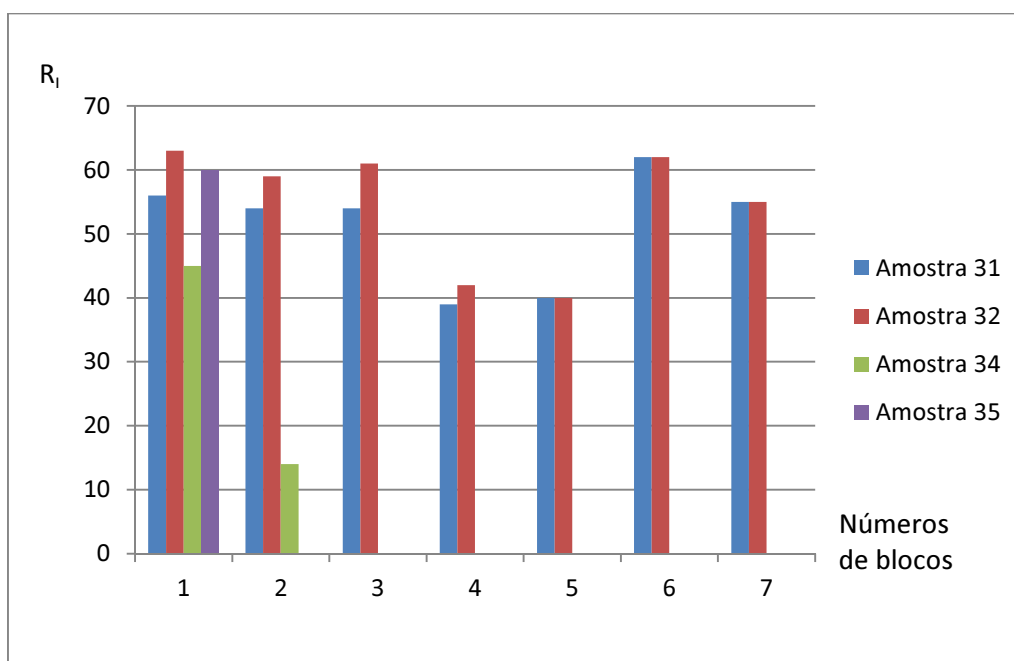


Figura 4.35 – Distribuição dos valores obtidos para cada grupo de amostras ensaiado para resistência ao ressalto

c) Resistência à compressão pontual

O ensaio de resistência à compressão pontual foi realizado em amostras irregulares, secas, obtidas diretamente no campo e cujas dimensões podem ser observadas no anexo IV. As amostras do ponto 32 vieram a demonstrar não serem representativas por se encontrarem muito meteorizadas (W_4) e como tal não foram ensaiadas. As amostras sãs, disponíveis para o mesmo local, exibiam dimensões que não cumpriam os requisitos da normalização e, dada a impossibilidade técnica de obtenção de amostras regulares, foi forçoso o abandono da caracterização deste ponto de amostragem, para este ensaio.

Os resultados constantes na tabela 4.30 e na figura 4.36, ilustram claramente dois grupos distintos de rochas, separados em função da respetiva intensidade de meteorização.

Tabela 4.30 - Resumo dos resultados da resistência à compressão pontual

Amostra nº	I_{S50} (MPa)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	10,13	3,49	7,80	1,81
35 (W ₁)	11,13	2,42	7,85	3,03
35 (W ₃)	1,40	0,33	0,71	0,34

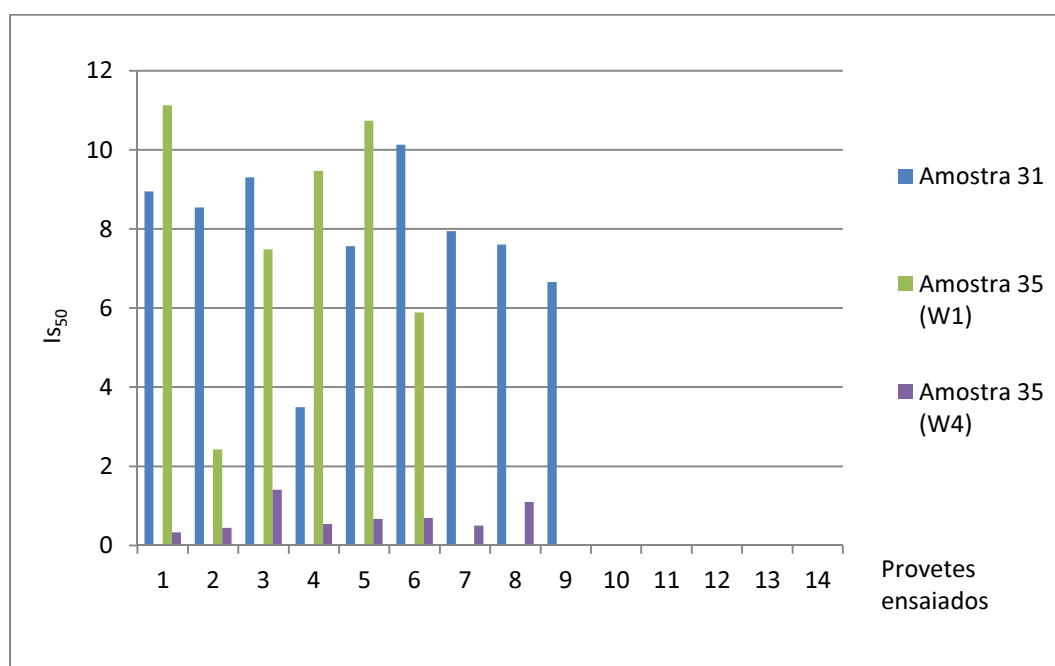


Figura 4.36 – Distribuição dos valores obtidos para a resistência à compressão pontual

Os provetes da amostra 35 correspondem a gabros medianamente alterados, com valor médio de 0,7 MPa mas com baixa dispersão de resultados. A amostra 31, de rocha sã, caracterizada em outros ensaios geotécnicos, apresenta valores médios de I_{S50} da ordem dos 8 MPa, rocha de resistência elevada, embora com uma dispersão de resultados considerável. Os valores médios obtidos para os gabros de boa qualidade são superiores aos valores obtidos por (Aggitalis *et al.*, 1996) em 63 amostras, que rondou apenas 1,36 MPa; este valor é inclusive inferior ao do desvio padrão obtido na amostragem da presente tese, devendo corresponder a gabros que apresentem uma porosidade superior à dos recolhidos em Beja.

d) Resistência à tração indireta

Os valores obtidos neste ensaio de RTB - tabela 4.31, não revelam, a nível dos seus valores médios, qualquer distinção entre os três conjuntos de rochas ensaiadas (figura 4.37), rondando 17 MPa, valores dentro dos intervalos de 5-30 MPa, definidos na bibliografia consultada - tabela 1.5. Incluindo ao nível do desvio padrão, não se evidencia uma distinção das amostras com fraturas cimentadas, do conjunto 32 (W_2), das do conjunto de amostras 31, tal deve-se ao facto de se ter tido o cuidado, no início do ensaio, em colocar as fraturas visíveis o mais paralelas possível ao eixo de aplicação do carregamento no provete.

Tabela 4.31 - Resumo dos resultados da resistência à tração brasileiro (Gomes, 2011)

Amostra	σ_t (MPa)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	25,16	13,15	16,90	2,71
32 (W_1)	21,02	14,12	16,58	1,73
32 (W_2)	20,87	13,01	16,92	3,08

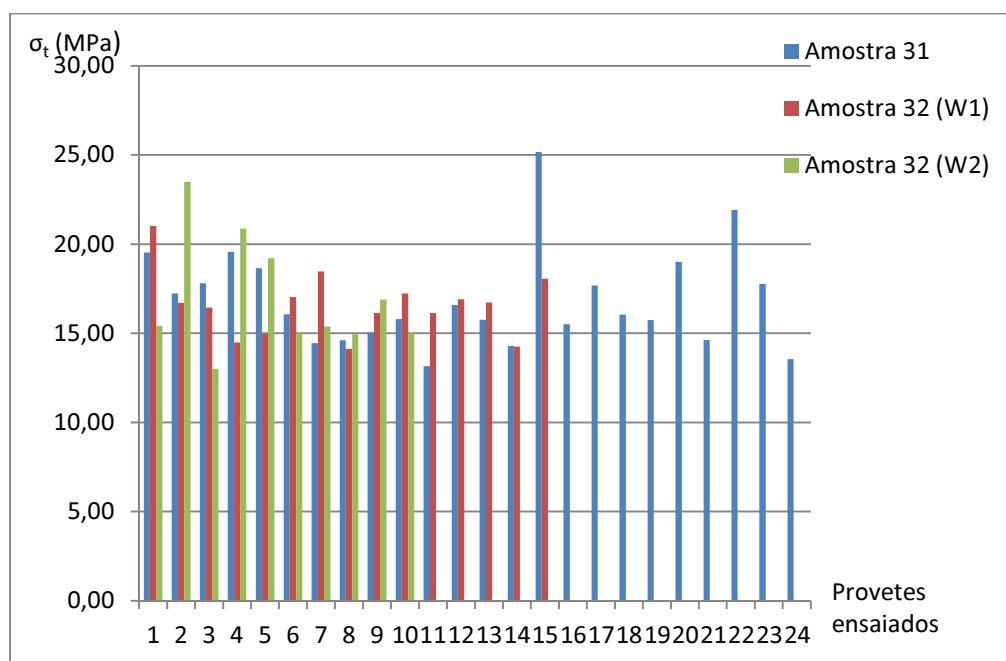


Figura 4.37 – Distribuição dos valores obtidos para a resistência à tração indireta

e) Resistência à compressão uniaxial

No ensaio de resistência à compressão uniaxial obtiveram-se os valores resumidos na tabela 4.32 e que representam a resistência elevada da rocha em referência, confirmando valores obtidos nos ensaios anteriores de compressão pontual e de resistência à tração indireta.

Tabela 4.32 - Resumo dos resultados da resistência à compressão uniaxial

Amostra	σ_c (MPa)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	211,09	105,06	157,88	31,23
32 (W_1)	180,49	89,41	142,57	28,74
32 (W_2)	152,88	95,37	123,18	23,73

A análise dos resultados obtidos – tabela 4.32, permite verificar que os conjuntos ensaiados e que não exibem fraturas cimentadas, amostras número 31 e 32 (W_1), apresentam valores médios de resistência de 143 a 158 MPa, ligeiramente fora do intervalo de valores da tabela 1.5; tal poderá dever-se a vários fatores, a saber:

- i) um deles poderá ser o facto das dimensões dos provetes ensaiados terem uma relação L/D de 2,5, enquanto que a maioria dos provetes ensaiados em mecânica das rochas apresentam uma relação L/D de 2, seguindo as recomendações da ISRM;
- ii) acresce ainda que a taxa de carregamento utilizada conduziu à rotura dos provetes em pouco mais de cinco minutos, enquanto que a maior parte dos ensaios realizados em mecânica das rochas tendem a ter rotura entre seis a dez minutos, utilizando portanto taxas de carregamento menores, de acordo com a ISRM.

Estes dois fatores, em conjunto, bastam para explicar a obtenção, nesta investigação, de valores médios de resistência ligeiramente inferiores. A dispersão de resultados relativamente ao valor médio calculado é no máximo da ordem dos 20%. Relativamente às amostras do grupo 32 (W_2) verificou-se que houve fraturas que condicionaram o valor da resistência uma vez que aproveitaram, na totalidade ou em parte, fraturas cimentadas que existiam nos provetes. Desta feita, e dado que se possuíam sete provetes, optou-se por desprezar os dois valores mais baixos, de 27 e 38 MPa, sendo a média realizada com os restantes valores válidos.

Dos 22 ensaios válidos realizados foi possível construir as curvas tensão-extensão correspondentes e determinar os módulos de elasticidade, secante (E_{sec}) e tangente (E_{tg}), e os coeficientes de Poisson, resumidos respetivamente nas tabelas 4.33 e 4.34. Por limitações da folha de cálculo empregada,

apenas se utilizaram 250 das cerca de 6000 leituras realizadas para cada provete ensaiado. As figuras 4.37 a 4.39 ilustram para os três grupos de ensaios realizados as curvas tensão-extensão obtidas.

Tabela 4.33 - Resumo dos resultados da determinação dos módulos de elasticidade estáticos, segundo (Gomes, 2011)

Amostra	E_{sec} (GPa)				E_{tg} (GPa)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	152,8	79,7	111,9	21,84	148,0	60,0	109,6	24,29
32 (W_1)	123,3	66,1	92,2	19,81	130,0	50,0	92,9	24,76
32 (W_2)	131,2	63,8	97,2	27,52	139,0	85,0	108,3	18,41

Tabela 4.34 - Resumo dos resultados da determinação dos coeficientes de Poisson, segundo (Gomes, 2011)

Amostra	ν			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	0,45	0,16	0,26	0,07
32 (W_1)	0,35	0,10	0,23	0,07
32 (W_2)	0,44	0,11	0,32	0,13

Os valores médios determinados nestes ensaios mecânicos para o coeficiente de Poisson classificam-nos como médios segundo os valores típicos para esta grandeza definidos por (Gerçek, 2007) - intervalo 0,2-0,3, sendo ligeiramente superiores aos valores médios obtidos para o coeficiente de Poisson dinâmico.

A análise das curvas tensão – extensão obtidas para as amostras 31 e 32 (figuras 4.38 a 4.40) confirmam a baixa porosidade dos provetes ensaiados na medida em que não se evidencia nenhum trecho inicial côncavo para cima, no início do ensaio, o mesmo será dizer que não ocorre recompressão inicial. Acresce que na globalidade e salvo pequenas perturbações, explicadas pelo facto do extensómetro se ter danificado no decurso do ensaio, as curvas revelam um comportamento perfeitamente elástico até à rotura, como seria de esperar em materiais de baixa porosidade e peso volúmico elevado. No que diz respeito ao gráfico tensão – extensão dos provetes da amostra 32 (W_2), já denotam dois trechos de comportamento elástico: um primeiro até se atingir a tensão de cedência do material e outro a partir daí, traduzindo no geral um comportamento

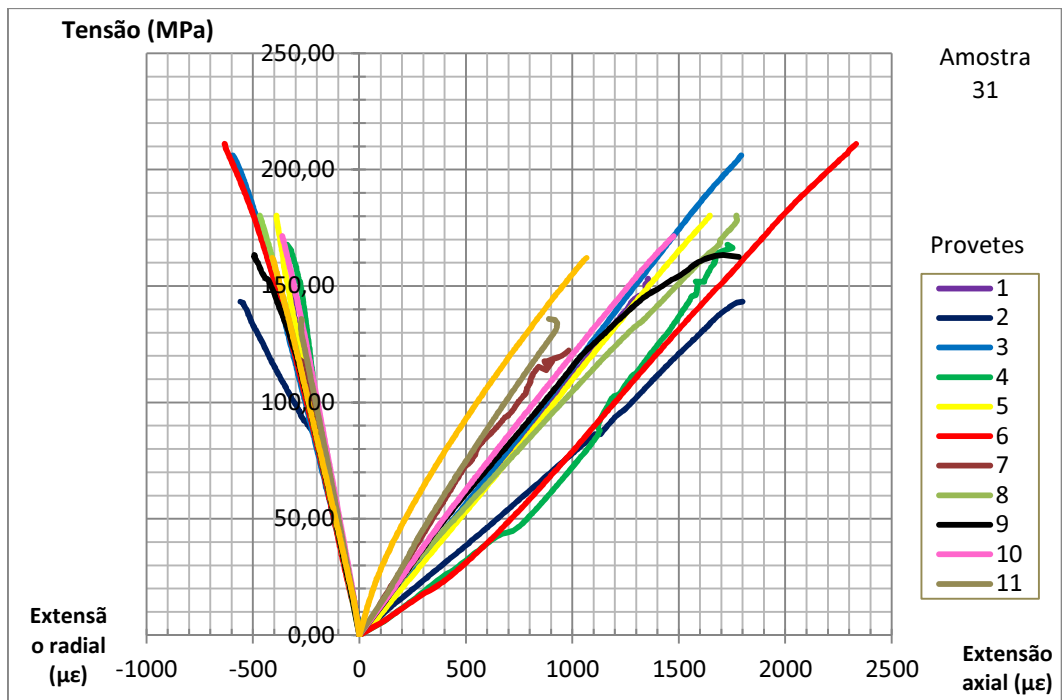


Figura 4.38 – Gráfico tensão-extensão para todos os provetes da amostra 31

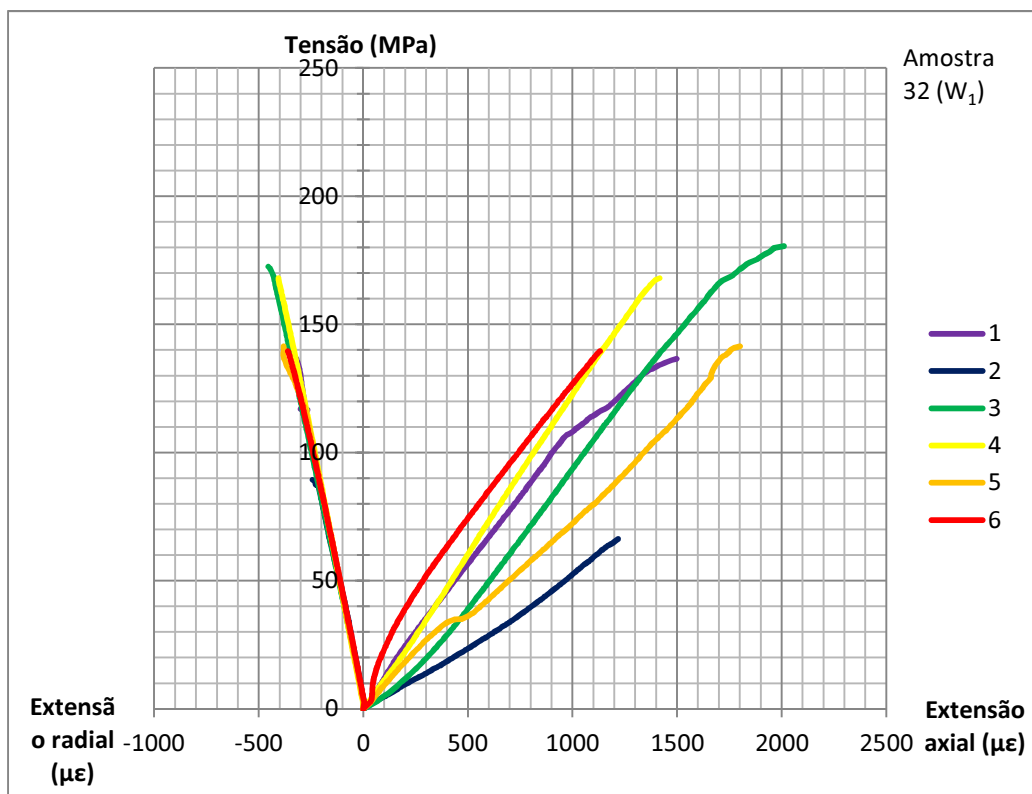


Figura 4.39 – Gráfico tensão-extensão para todos os provetes da amostra 32 (W_1), adaptado de (Gomes, 2011)

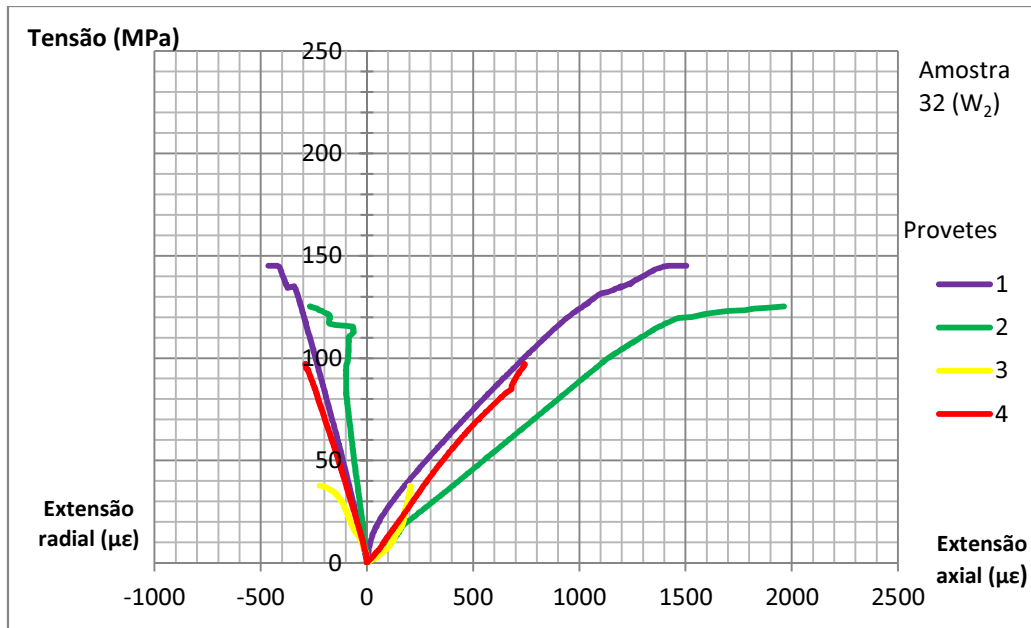


Figura 4.40 – Gráfico tensão-extensão para todos os provetes da amostra 32 (W_2) (Gomes, 2011)

elástico não linear. No trecho inicial dos provetes 2 e 3 da amostra 32 (W_2) - figura 4.40 - parece notar-se uma ligeira recompressão devido às microfissuras que estes provetes apresentavam. Aliás, são estas microfissuras internas, características deste tipo litológico dada a sua génese e evolução geológica, que provocam uma maior dispersão de resultados nos ensaios destrutivos.

As figuras 4.41 a 4.46 ilustram as diferenças entre os módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson, dinâmicos e estáticos, para os três grupos de amostras ensaiadas.

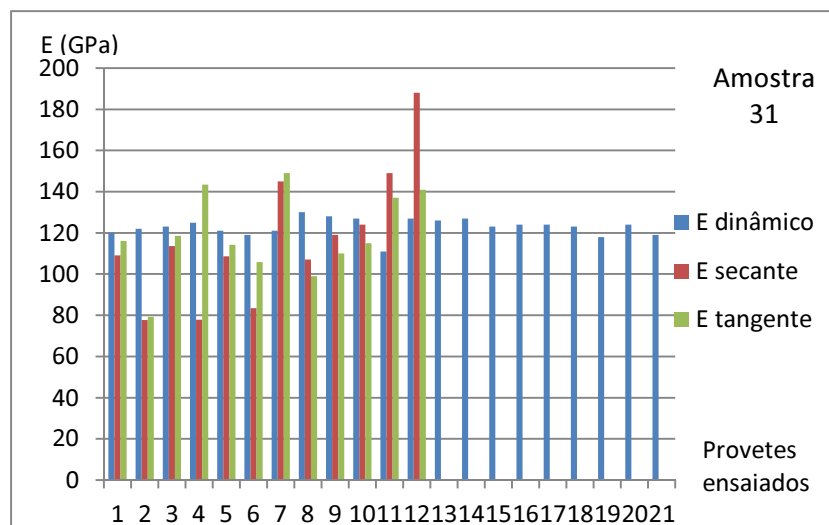


Figura 4.41 – Comparação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático

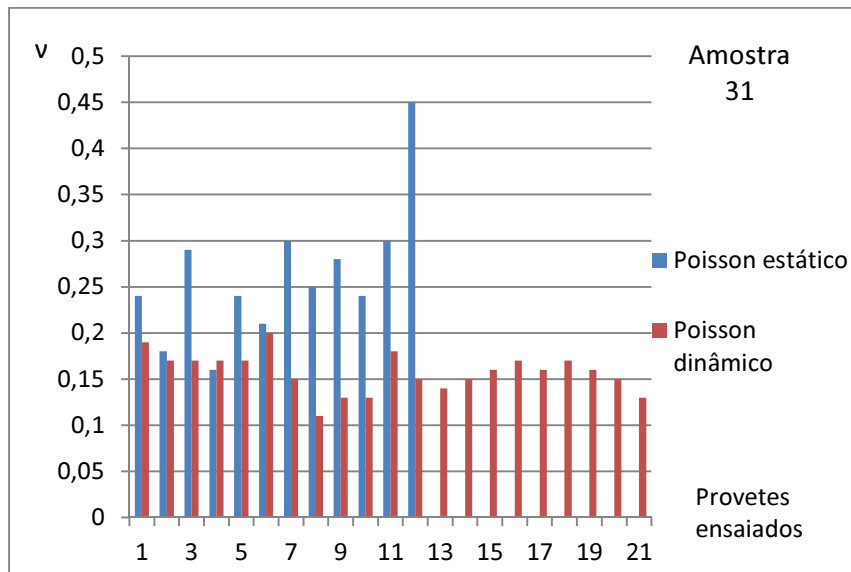


Figura 4.42 – Comparação entre os coeficientes de Poisson dinâmico e estático

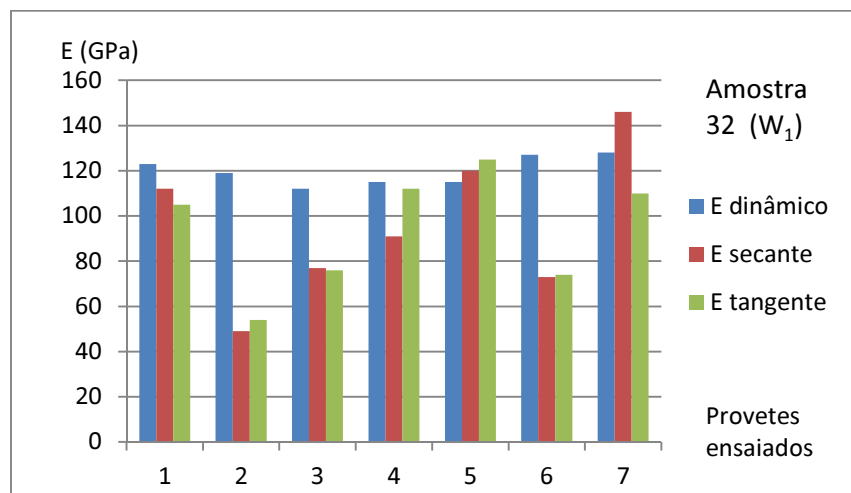


Figura 4.43 – Comparação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático

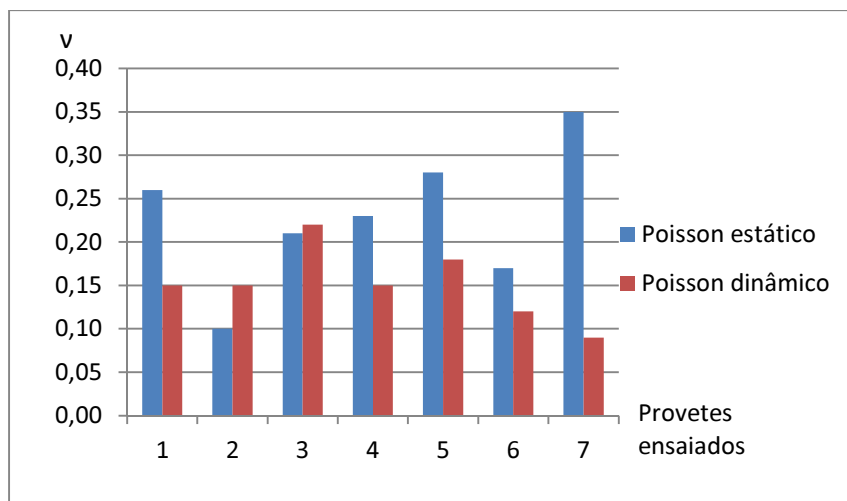


Figura 4.44 – Comparação entre os coeficientes de Poisson dinâmico e estático para a amostra 32 (W_1)

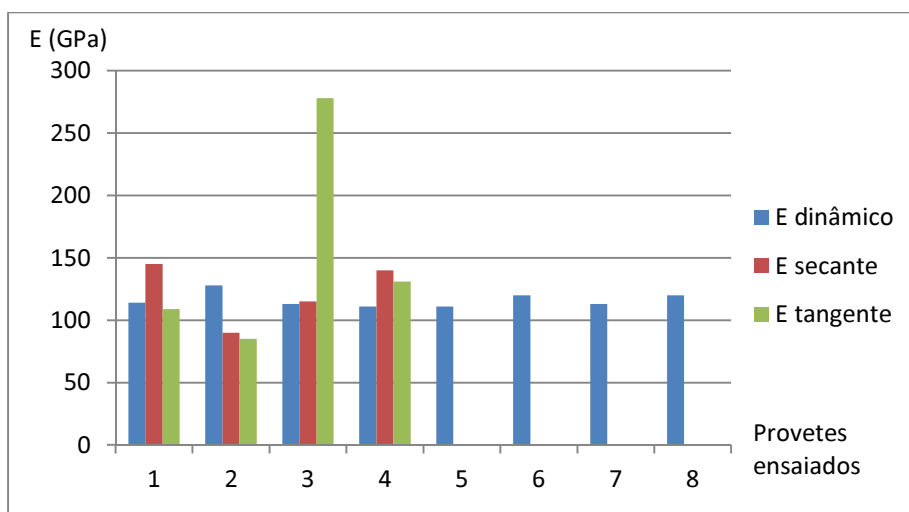


Figura 4.45 – Comparação entre os módulos de elasticidade dinâmico e estático para a amostra 32 (W_2)

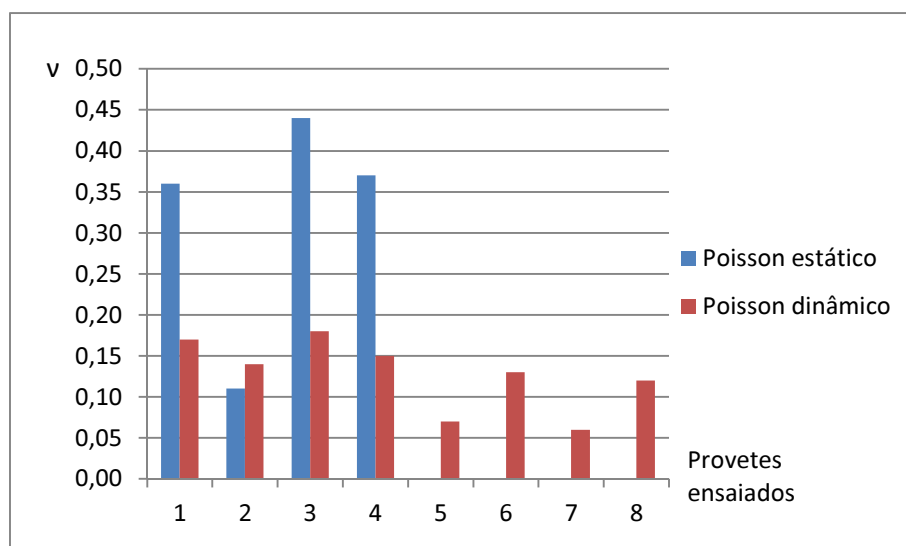


Figura 4.46 – Comparação entre os coeficientes de Poisson dinâmico e estático para a amostra 32 (W_2)

Dos resultados apresentados nas figuras 4.41 a 4.46, pode-se concluir que, regra geral e como seria de esperar, os módulos de elasticidade dinâmicos apresentam valores superiores aos módulos de elasticidade estáticos. Pelo contrário, no caso do coeficiente de Poisson são os valores estáticos a superar os dinâmicos, o que também seria de esperar uma vez que se trata de um ensaio que aplica níveis de deformação na amostra e portanto daí resultam valores inferiores para este parâmetro.

Em qualquer dos grupos de amostras é evidente a presença de valores anómalos que sobressaem do conjunto e que justificam os valores mais elevados dos desvios padrão calculados. Os valores dos parâmetros obtidos de forma dinâmica demonstram um comportamento mais regular e homogêneo, com desvios padrão mais baixos, que se podem dever ao facto de serem obtidos em ensaios não destrutivos. Alguns dos valores anómalos poderão ser explicados por motivos de ordem técnica ou de procedimento de ensaio, nomeadamente ao facto de se terem utilizado extensómetros de fabrico chinês em vez dos de origem japonesa no caso dos extensómetros radiais danificados próximo do final do ensaio, ou por reajustes nas microfissuras, durante o primeiro ciclo de carga, que amplificaram a resistência final do provete.

Para 6 provetes da amostra 31 ensaiados à resistência à compressão uniaxial e que apresentaram superfícies de rotura mais ou menos regulares, realizou-se a medição do ângulo de inclinação da superfície de rotura. O registo desses ângulos (β) permitiu, de acordo com o critério de Mohr-Coulomb, determinar de forma expedita ao valor do ângulo de atrito interno ou de resistência ao corte (φ). Ambos os resultados encontram-se representados nas tabelas 4.35 e 4.36. Para estes registos não foram considerados os provetes com rotura explosiva ou aqueles que romperam por superfícies pré definidas - diaclases.

Os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza do ângulo de atrito interno do *tilt test* embora ligeiramente superiores, na medida em que as superfícies de rotura são irregulares, devido à própria textura da rocha, podendo acrescentar ou retirar alguns graus aos valores medidos.

Tabela 4.35 – Estimativa grosseira do ângulo de atrito interno (φ) com base na inclinação das superfícies de rotura (β) com o plano horizontal

Amostra nº	φ (°)
31	43
	39
	41
	43
	40
	37
	42
	43
	39
	41
	43
	43
	41
	43
	41
	43
	39
	45

Tabela 4.36 – Valores médio, máximo e mínimo, determinados para o ângulo de atrito interno do material rochoso

Amostra nº	φ (°)			
	máximo	mínimo	média	desvio padrão
31	45	37	41	1,98

4.4.4 Correlações entre propriedades índice dos gabros

O conhecimento de propriedades geotécnicas da rocha intacta, como a porosidade e a resistência, são fatores importantes do ponto de vista da engenharia e contribuem para um dimensionamento mais adequado. O facto de nem sempre ser possível a realização de ensaios laboratoriais para obtenção destas propriedades torna, muitas vezes, o recurso a ensaios *in situ* e a correlações a forma mais rápida e simples de determinar algumas grandezas do material rocha. Para a credibilidade das correlações, contribui o conhecimento dos fatores de correlação aplicados à rocha que se deseja caracterizar, bem com o número de ensaios laboratoriais e *in situ* que disponibilizam essa informação.

Ilustram-se nesta secção algumas das correlações registadas entre os parâmetros obtidos para os gabros, na faixa Beringel-Beja.

Salienta-se o facto de, por razões técnicas, nem sempre existir uma correlação direta entre dados de um mesmo provete para diferentes ensaios. Os valores utilizados para a realização das correlações representam o gabro de melhor qualidade (W_1) por ser deste material que se obteve a maior quantidade de resultados - amostras 31 e 32, e porque os valores da rocha ligeiramente meteorizada – amostra 32 (W_2), poderem manifestar-se anómalos, retirando o eventual significado destas correlações. Refere-se ainda que não se procedeu a correlações entre os valores obtidos para o peso volúmico e os restantes ensaios, como muitas vezes referido na bibliografia, uma vez que a gama de valores deste parâmetro é muito pequena, entre 28 e 30 kN/m³ (tabela 4.24), como se pode verificar da tentativa que se efetuou para a porosidade, descrita em seguida.

Na avaliação da correlação entre os valores obtidos para a porosidade e as restantes grandezas foi realizada uma correlação direta de provetes que resulta num menor número de valores para a obtenção da referida correlação, em relação ao número total de provetes ensaiados. Apenas se apresentam as correlações respetivamente, entre a porosidade e a resistência à compressão uniaxial (figura 4.47) e aquela grandeza e a velocidade de propagação das ondas P (figura 4.48), dado serem estas as únicas a demonstrar uma menor dispersão de resultados, que mesmo assim só revelaram coeficientes de determinação aceitáveis com linha de tendência não linear.

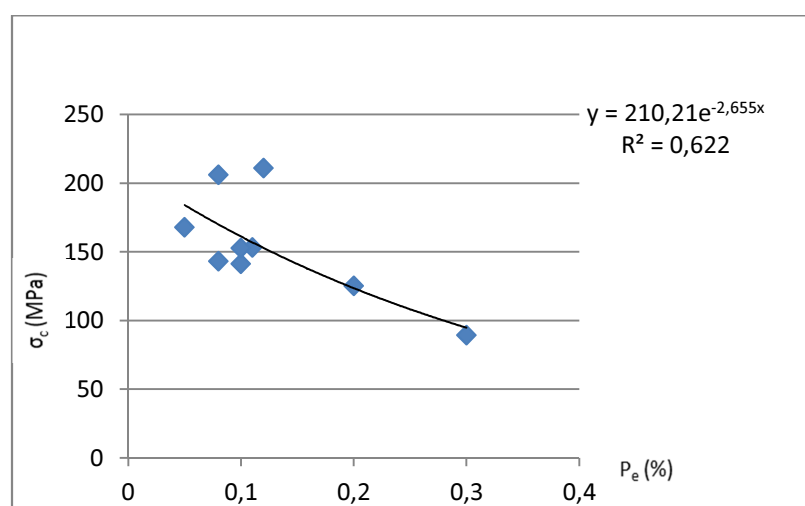


Figura 4.47 – Gráfico de correlação entre a porosidade efetiva e a resistência à compressão uniaxial

Pela análise da figura 4.47 verifica-se, como seria de esperar, que a valores de porosidade mais baixa correspondem resistências mais elevadas. Optou-se pela representação de uma correlação linear e

não exponencial dado que, mesmo com esta última, não se verificava um aumento no valor do coeficiente de determinação, que se mantinha inferior a 0,4.

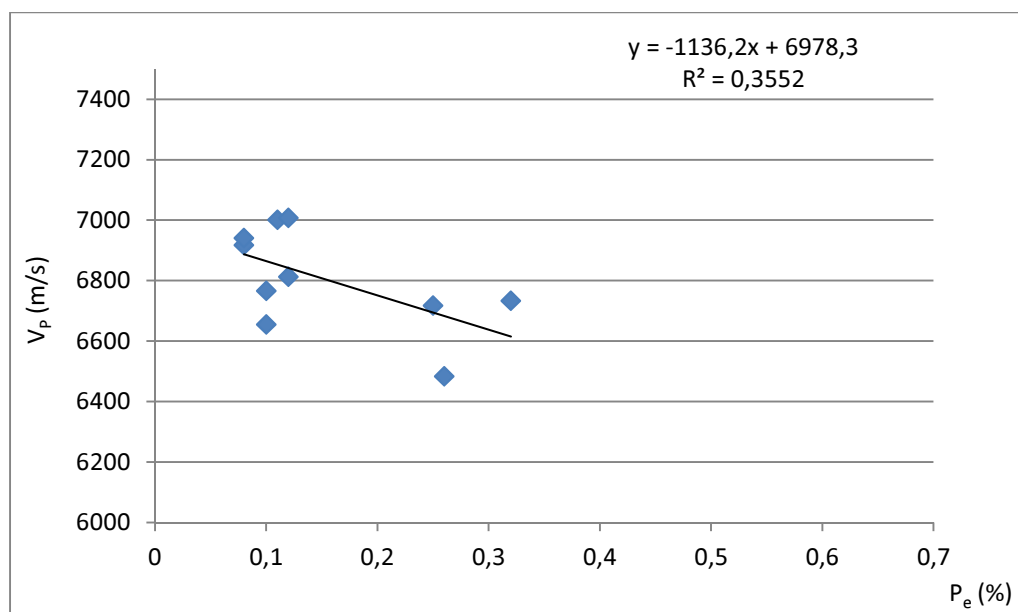


Figura 4.48 – Gráfico de correlação entre a porosidade efetiva e a velocidade de propagação das ondas P

A figura 4.48 demonstra que aos valores de porosidade mais baixa correspondem velocidades de propagação mais altas, como seria de esperar, embora mais uma vez o valor do coeficiente de determinação seja baixo, na ordem dos 0,3. A figura 4.49 representa a relação entre o ensaio de resistência à tração indireta (RTB) e o ensaio de compressão uniaxial (RCU) e para a qual se utilizaram os provetes das amostras 31 e 32 (W_1), mas sem correlação direta entre si. O gráfico representado ilustra, como nos gráficos anteriores, uma razoável dispersão de resultados que é traduzida pelo coeficiente de determinação de apenas 0,15. Mantém-se no entanto a tendência de que aos valores mais elevados de resistência à compressão uniaxial correspondem também os valores mais elevados de resistência à tração indireta, com um fator de conversão médio de 8, aproximando-se do valor 10 que geralmente é recomendado na bibliografia.

A figura 4.50 ilustra a relação entre o ensaio de compressão uniaxial (RCU) e o ensaio de resistência à compressão pontual (PLT). Neste caso e pelas razões expostas em 4.4.3 c), apenas se utilizaram os valores relativos ao ponto 31. Provavelmente derivado ao reduzido número de provetes utilizados, a correlação entre o ensaio de compressão uniaxial e o ensaio de resistência à compressão pontual não revela coeficiente de determinação. A correlação proposta pela ISRM e por outros autores (Aggitalis *et al.*, 1996) para estes ensaios aponta um fator médio de conversão de 22 ($\sigma_c = 22 * I_{s(50)}$), enquanto que no caso do presente trabalho o fator médio de conversão obtido foi de 20.

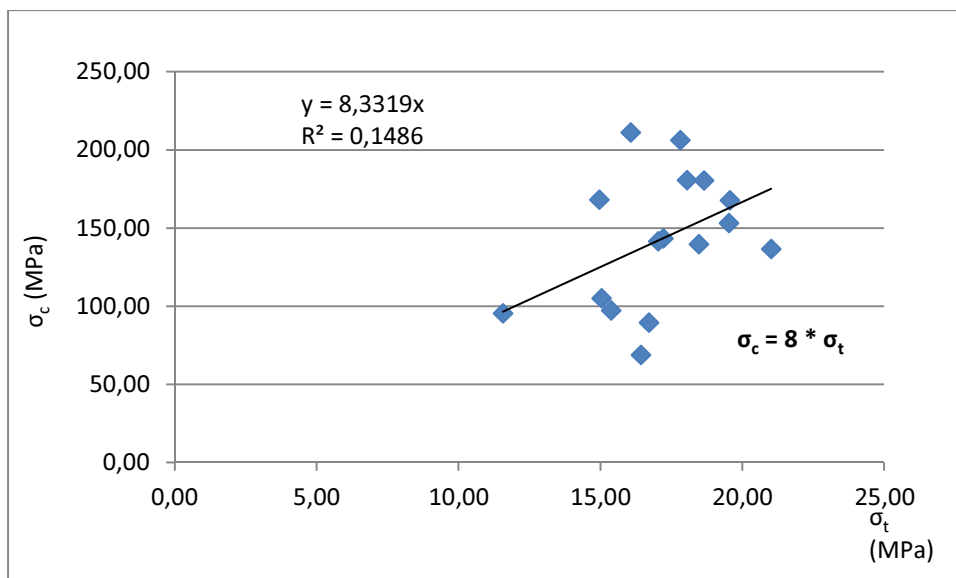


Figura 4.49 – Gráfico de correlação entre a RCU e a RTB

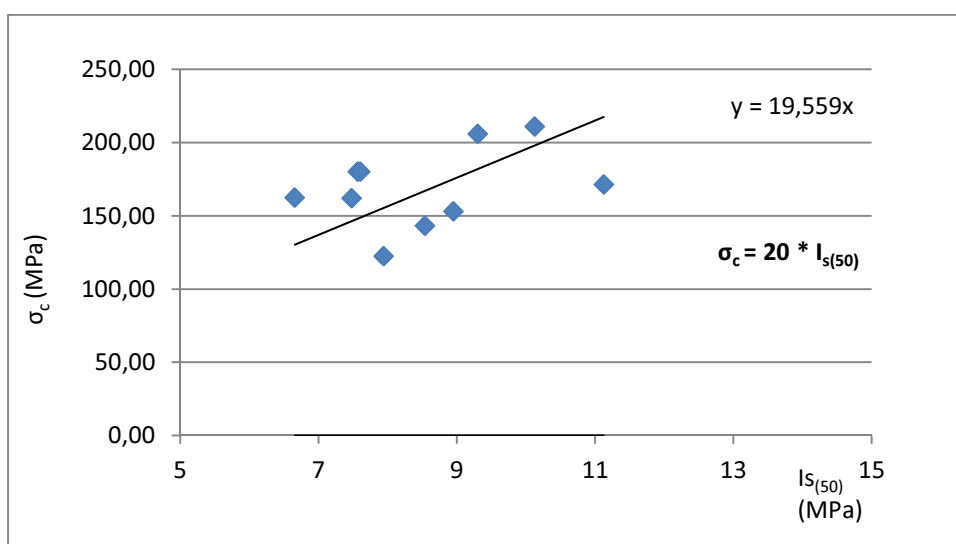


Figura 4.50 – Gráfico de correlação entre a RCU e a resistência à compressão pontual

A ISRM propõe ainda a correlação entre o ensaio de compressão pontual e o ensaio de resistência à tração indireta, com um fator de conversão de 1,5 ($\sigma_t = 1,5 * I_{s(50)}$). Para o presente caso o fator de correlação obtido foi de 2, ilustrado no gráfico da figura 4.51, no qual se observa novamente que o coeficiente de determinação é inexistente.

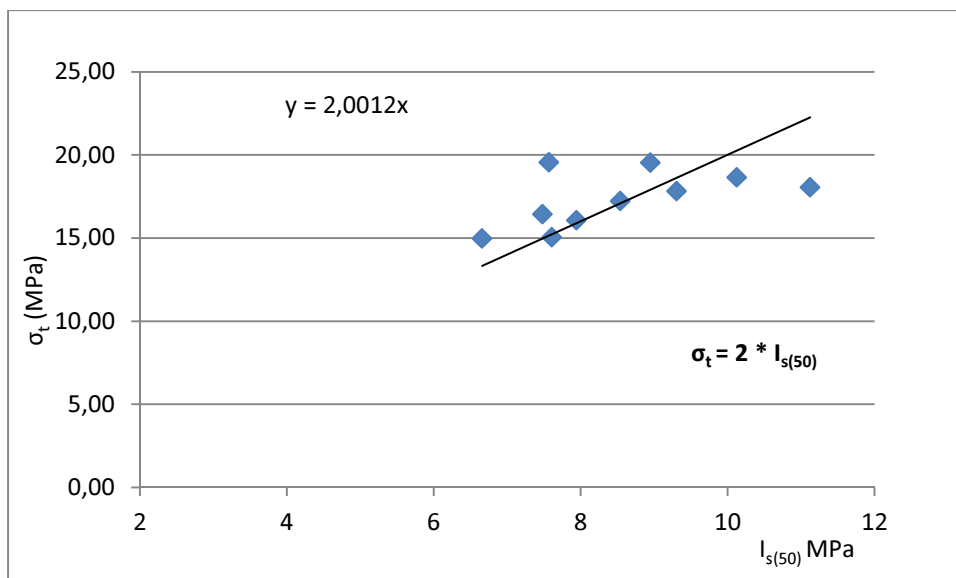


Figura 4.51 – Gráfico de correlação entre a resistência à tração indireta e a resistência à compressão pontual

A correlação apresentada – figura 4.52, relaciona a resistência à compressão uniaxial com o ensaio expedito da determinação da dureza ao ressalto, onde mais uma vez se observa uma dispersão de valores relevante, o que é de esperar em se tratando do ensaio com o esclerómetro. Este facto influenciou a seleção de uma linha de tendência exponencial.

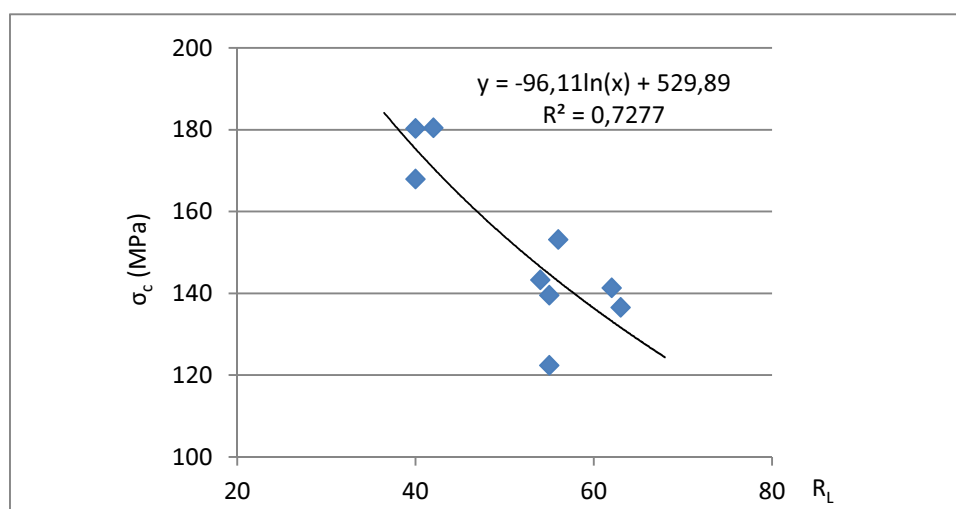


Figura 4.52 – Gráfico de correlação entre a RCU e a dureza ao ressalto do ensaio com esclerómetro tipo L

Por último apresenta-se o gráfico de correlação entre o módulo de elasticidade (E_{tg}) e a resistência à compressão uniaxial - figura 4.53, que mais uma vez traduz valores baixos de correlação, com um coeficiente de determinação inferior a 1, para uma linha de tendência exponencial. A relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão uniaxial, para vários tipos de rochas, encontra-

se ilustrada no gráfico de Deere (Deere, 1966) e sobre o qual se representam as amostras deste estudo – figura 4.54.

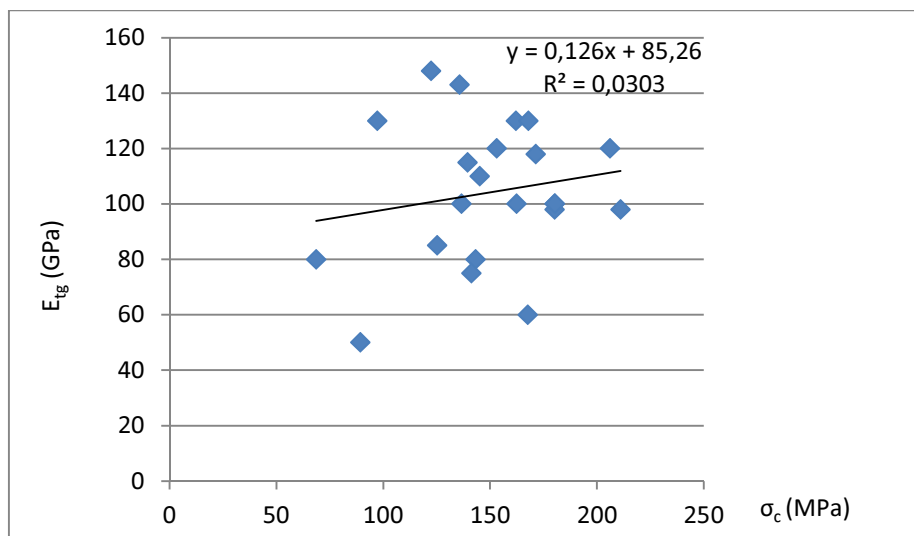


Figura 4.53 – Gráfico de correlação entre o módulo de elasticidade (E_{tg}) e a RCU

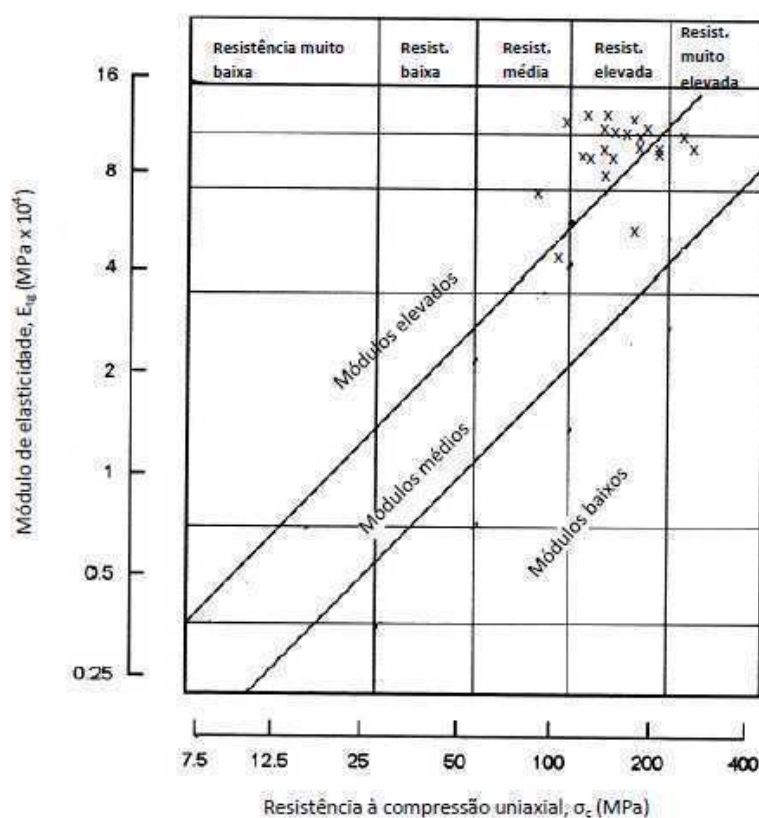


Figura 4.54 – Posição dos provetes de gabo ensaiados no gráfico de correlação entre o módulo de elasticidade (E_{tg}) e a RCU segundo Deere, 1996

A disposição dos resultados no gráfico da figura 4.54, classifica os provetes de gabro ensaiados como rochas de elevada resistência e módulo de elasticidade elevado, o que está concordante com os valores obtidos para os parâmetros físicos e mecânicos já apresentados – tabelas 4.32 e 4.33.

Das correlações que se estabeleceram concluir-se que existe, regra geral, uma grande dispersão de valores, com $R=0,55$, mas não longe dos valores obtidos por outros autores (Aggitalis *et al.*, 1996), com $R=0,54$ a $R=0,62$, exatamente para amostras de gabro e para as mesmas correlações. Ter-se-iam obtido melhores resultados, salvo melhor opinião, com um maior número de provetes ensaiados que permitissem correlações diretas e, partindo de ensaios que não exibam à partida, valores de resultados com dispersões que rondam 20% relativamente aos respetivos valores médios obtidos.

4.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados todos os resultados obtidos na caracterização da área em investigação, dos materiais rochosos e solos seus derivados. Os resultados dos levantamentos de campo permitiram corroborar dados existentes na bibliografia e contribuir para um novo esboço litológico da área em estudo. A identificação macro e microscópica da mineralogia dos gabros viu-se confirmada nas análises de FRX realizadas. A evolução da rocha no seu perfil de meteorização permitiu distinguir dois tipos de solos residuais: o saprólito e os barros de Beja. O saprólito é, como seria de esperar, mais próximo da rocha mãe, quer na sua mineralogia quer na sua cor e textura grosseira, sendo classificado maioritariamente como um SM – areia siltosa com cascalho. Os barros são solos mais evoluídos dentro do perfil de meteorização e caracterizados por minerais argilosos que se esperavam de elevada atividade. São solos maioritariamente classificados como CL – argila magra com areia ou arenosa, embora também tenham sido identificadas amostras de classificação MH – silte elástico com areia. Os valores obtidos para o índice de plasticidade – tabela 4.17, ficaram abaixo dos referidos na literatura para os solos com argilas do grupo da esmectite, facto que se explica pela identificação em DRX, de minerais interestratificados de esmectite-ilite. A baixa capacidade de troca catiónica encontrada nestes solos – tabela 4.9, pode também justificar os valores abaixo do espetável para o MgO e Fe_2O_3 . Estes resultados sugerem que estes solos se encontram ainda pouco evoluídos em termos de meteorização e/ou alteração. Como solos argilosos que são, exibem consolidação e expansibilidade. Quanto à consolidação verifica-se que depende significativamente do teor de água inicial da amostra, uma vez que este depende o índice de vazios inicial – figura 4.15, e a expansibilidade mantém uma relação direta com o carregamento, expandindo mais as amostras sujeitas a cargas menores – tabela 4.23.

A determinação das propriedades físicas e mecânicas da rocha intacta permitiu evidenciar que o gabro são a ligeiramente meteorizado, apresenta valores de peso volúmico elevado e porosidade aparente baixa, contribuindo para resistências e velocidades de propagação das ondas sísmicas elevadas.

Foram realizadas várias tentativas de correlação entre os diversos parâmetros obtidos, quer no caso dos solos quer para a rocha intacta. As correlações aplicadas revelaram, muitas vezes, grande dispersão de valores, que poderá justificar-se pelo número de amostras utilizadas para este fim, que foi mais reduzido no caso dos solos devido a problemas de amostragem. A dificuldade de recolha de amostras válidas associada ao reduzido tempo disponível para o desenvolvimento do programa de investigação condicionou a eventual melhoria desses valores. Os resultados obtidos constituem a informação preliminar sobre os gabros e os solos associados ao seu perfil de meteorização, na faixa Beringel-Beja, que poderão ser detalhados por futuras investigações.

Capítulo 5- Considerações finais e desenvolvimentos futuros

5.1 Considerações finais

Os objetivos desta Tese são os de contribuir para a caracterização geotécnica dos gabros do Complexo Ígneo de Beja - CIB, particularmente para a região compreendida entre Beringel e Beja e o de disponibilizar a informação geotécnica associada ao perfil de meteorização das rochas com a caracterização de cada unidade de acordo com os pressupostos do EC7 (NP EN 1997-1:2010).

Os resultados conseguidos decorrem, essencialmente, de trabalho de campo e de laboratório, com mais de uma quinzena de ensaios diferentes realizados, quer *in situ*, quer em mais de duas centenas de amostras recolhidas, no conjunto de solos residuais e rochas intactas de gabo.

Salienta-se a dificuldade na execução da amostragem, particularmente para as amostras não perturbadas em solos, quer devido à ausência de afloramentos, quer ao facto dos terrenos da área em estudo serem objeto de uma intensa atividade agrícola, o que promove uma contínua perturbação dos mesmos. A remoldagem de amostras não foi considerada por se julgar que não se demonstraria representativa para as propriedades geotécnicas em estudo.

O acompanhamento de várias escavações para projetos de engenharia civil permitiu a observação e análise de cerca de 25 perfis de meteorização.

As gamas de valores obtidos encontram-se ilustradas no perfil tipo para a região investigada que consta da figura 5.1, onde se sintetizam as características determinadas para os gabros e para os solos residuais que se lhe encontram associados. Apresentam-se os valores máximos e mínimos adquiridos para que se considerem futuramente na obtenção dos valores característicos dos parâmetros geotécnicos em referência.

Com o intuito de facilitar a individualização das unidades geotécnicas consideradas no perfil de meteorização, optou-se por designá-las de zonas geotécnicas. A zona geotécnica 1, ZG1, corresponde aos gabros, são ou com ligeira meteorização; a zona geotécnica 2, ZG2, corresponde aos solos em

regra grosseiros do saprólito, e a zona geotécnica 3, ZG3, corresponde aos solos finos dos barros de Beja.

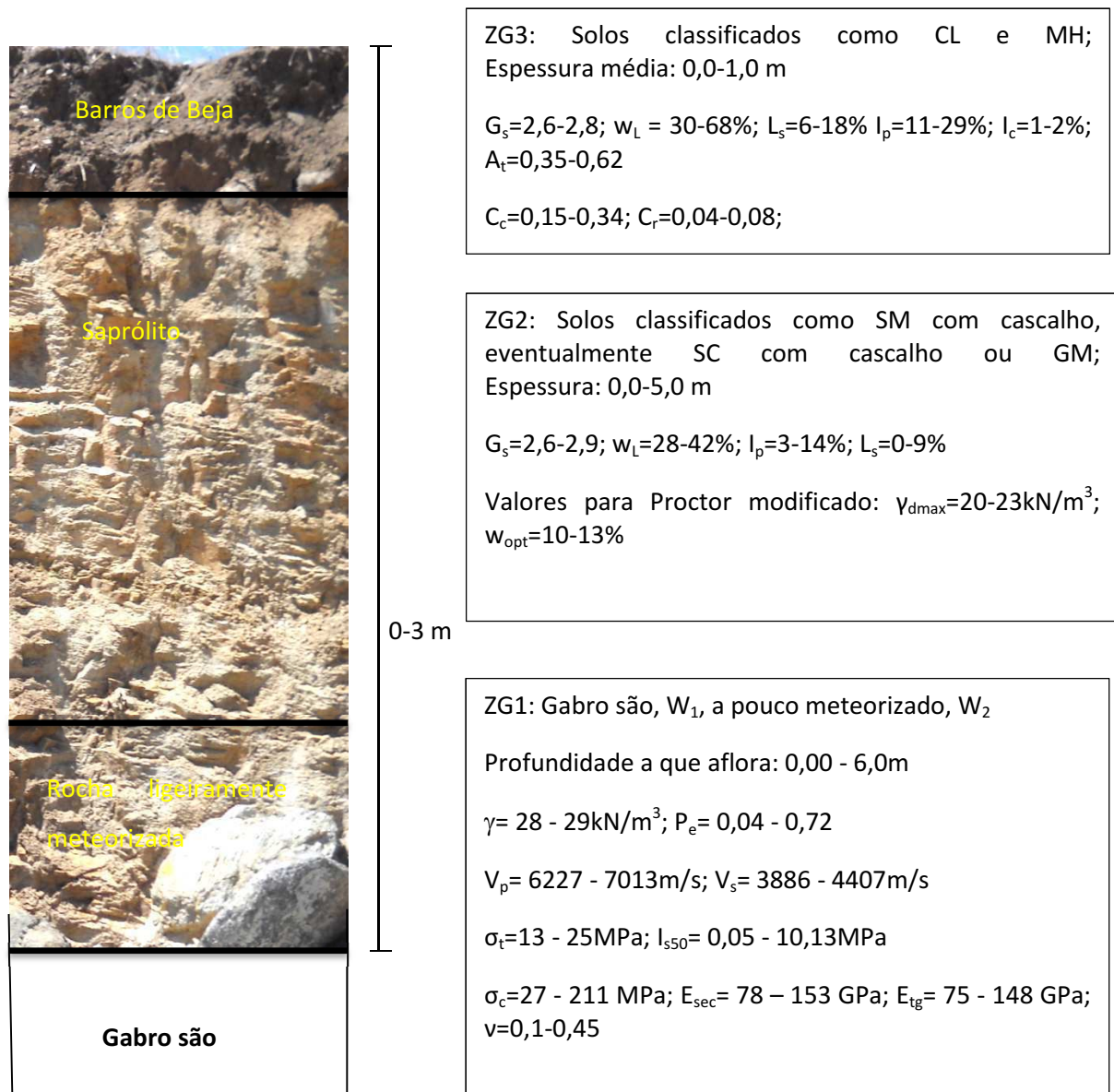


Figura 5.1 – Perfil de meteorização proposto para os gabros de Beja, na faixa entre Beringel e Beja, com as características geotécnicas determinadas para cada unidade.

Localmente, este perfil encontra-se diretamente encoberto por depósitos de cobertura recentes onde se incluem aluviões, coluviões, depósitos de aterro e outros mais antigos, como os calichos. Relativamente a estes últimos, as observações realizadas indiciam a ocorrência de episódios diversos de carbonatação e origens distintas destes solos dado que, se na maioria dos afloramentos superficiais a calichificação parece desenvolver-se segundo a superfície topográfica, indicando génese relacionados com fenómenos pedogénicos, as ocorrências em profundidade e nalguns locais,

associados a zonas de falha, terão uma origem distinta. Assim, a carbonatação subterrânea deixou dúvidas quanto à sua origem se dever apenas a meros fenómenos de percolação de águas (meteóricas e/ou subterrâneas) sugerindo-se antes que, geralmente, esta carbonatação se possa dever a fenómenos de metassomatismo ao longo de zonas tectonizadas. Dado que a presença destes materiais se associa a zonas de fraqueza do maciço, diminuindo a sua resistência, será relevante obter ulteriormente alguns parâmetros de caracterização geotécnica para estes materiais. Inferiamente ocorre então o CIB e seus terrenos de meteorização/alteração, que se passam a descrever. A figura 5.2 apresenta a envolvente dos fusos granulométricos obtidos para os solos residuais dos gabros de Beja.

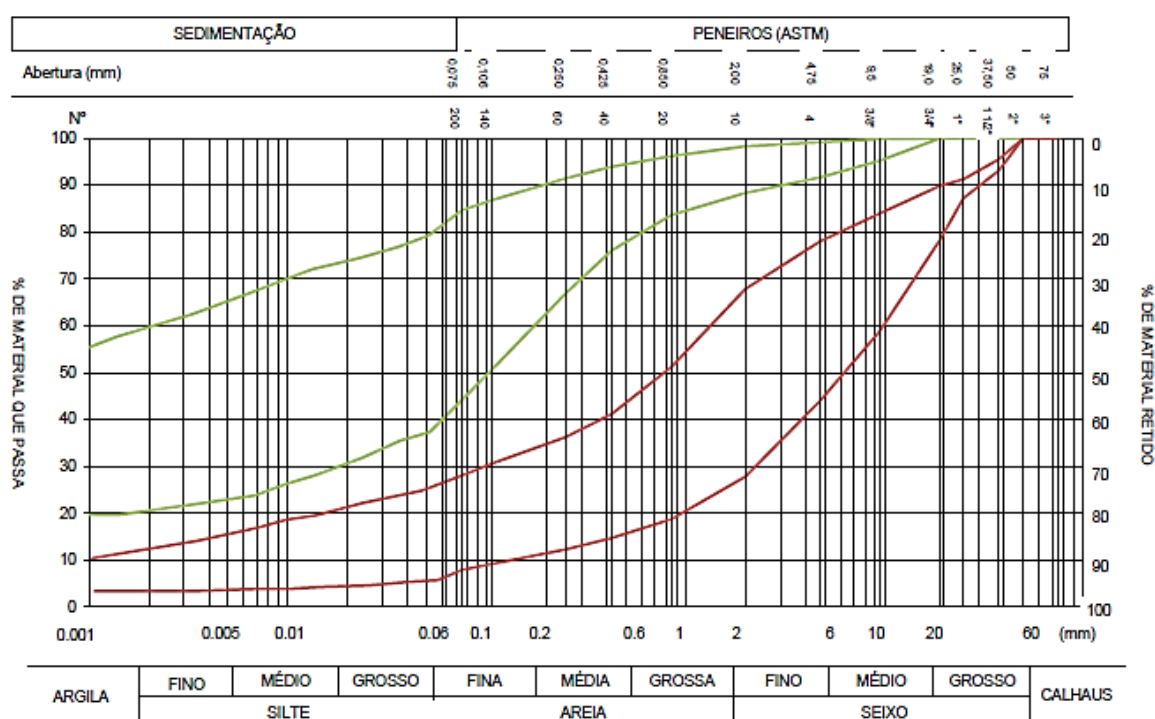


Figura 5.2 – Envolvente dos fusos granulométricos obtidos para os solos residuais: barros de Beja a verde, saprólito a *bordeaux*

A rocha mãe, ZG1, é constituída por rocha compacta, melanocrata, de cor cinza escuro, textura fanerítica frequentemente equigranular, normalmente de grão médio mas sendo possível encontrar variedades de grão fino ou grão grosseiro. A sua cor indicia a presença de minerais ferromagnesianos, minerais máficos, indicadores de uma rocha básica, cuja existência se confirmou na análise microscópica e nos resultados de fluorescência e difração de raios X. Nas amostras observadas ao microscópio foram identificados como minerais essenciais as plagioclases (56%-63%), piroxenas (11%-14%) e olivinas (6%-8%), e como minerais secundários (8%-10%) as anfíbolos, hiperstena e biotite.

Os gabros podem, às vezes, apresentar-se cortados por filões pegmatíticos tardios, de quartzo e feldspato, e ainda filões de carbonatos ou com preenchimentos argilosos. A estas rochas encontram-se também associadas mineralizações de óxidos de ferro, como é o caso de magnetites, visíveis em afloramento em pequenas massas.

A tabela 5.1 apresenta as gamas de valores obtidos nos ensaios de caracterização química, física, mecânica e dinâmica, realizados nestes materiais.

Tabela 5.1 - Síntese das propriedades dos gabros na faixa Beringel-Beja

Propriedades	Parâmetro	Gama de valores *
		ZG1, gabro W1
Físicas	w_{nat} (%)	0,0-0,0
	γ (kN/m ³)	28,4-29,0 (29)
	R_L	24-72
Dinâmicas	V_s (m/s)	3950-4410 (4180)
	V_p (m/s)	6220-7010 (6610)
Mecânicas	σ_t (MPa)	13 -25 (17)
	σ_c (MPa)	105 -211 (158)
	E_{sec} (GPa)	78 -153 (104)
	E_{tg} (GPa)	75 -148 (104)
	ν	0,16-0,45 (0,15)
	ϕ_b (°)	22-42 (33)
Químicas	Sílica (%)	48,4-54,8
	Alumina (%)	15,9-20,3
	Óxidos de ferro (%)	4,6-8,2
	Óxido de potássio (%)	0,05-0,2
	Óxido de magnésio (%)	5,9-10,2
	LOI (%)	0,5-2,9

* Valores médios entre parêntesis

A zona ZG2 corresponde a solos formados *in situ*, diretamente assentes na rocha mãe, classificados predominantemente (56% em dezasseis amostras) como SM, areia siltosa com cascalho, como se pode observar pela figura 5.2, que apresentam boa trabalhabilidade e boas características de resistência e permeabilidade, quando compactados, sendo por isso solos com condições adequadas para serem reutilizados como material de construção de terraplenos.

A zona ZG3 corresponde os solos residuais coesivos, barros de Beja, podendo ser classificados como CL, argila (67% em doze amostras) ou MH, silte elástico (25% em doze amostras), podendo apresentar-se quer compressíveis quer expansivos, demonstrando fracas características como material de construção. Verificou-se que os minerais de argila presentes nesta unidade pertencem ao grupo da montmorilonite, mas evidenciou-se o facto de se tratar de espécies interestratificadas – esmectite/ilite, e que a montmorilonite dominante é cálcica. Estes dados justificam os valores abaixo dos espectáveis, com base nos dados reproduzidos na bibliografia da especialidade, para os limites de liquidez e retração linear, e índice de plasticidade destes materiais, incluídos na tabela 5.2. Os baixos valores de CEC e de minerais ferromagnesianos obtidos para este horizonte, também inferiores ao esperado, ilustram materiais ainda pouco evoluídos no processo pedogenético.

Tabela 5.2 - Síntese das propriedades dos solos residuais dos gabros na faixa Beringel-Beja

Propriedades	Grandezas	Solo residual	
		ZG2, saprólito	ZG3, barros de Beja
Físicas	W_{nat}	2,0-13,0	5,1-41,1
	W_L	28-42	30-68
	W_P	15-31	17-39
	IP	3-14	11-29
	L_s	0-9	6-18
	G_s	2,6-2,9	2,53-2,83
	Fração seixo	6-72	0-12
	Fração areia	20-51	13-44
	Fração silte	3-32	23-40
	Fração argila	3-12	25-60
Químicas	Sílica	43,5-54,7	52,7-54,0
	Alumina	12,2-20,0	16,9-21,6
	Óxidos de ferro	5,9-9,8	5,7-7,6
	Óxido de potássio	0,05-0,2	0,15-0,2
	Óxido de magnésio	5,8-10,1	3,5-4,3
	LOI	3,5-8,4	7,1-8,7

(todos os valores em %, exceto G_s que é adimensional)

No âmbito da presente investigação verificou-se que o índice de compressibilidade para estas argilas oscilou entre 0,34 e 0,17, para escalões de carga entre 80 e 100 kPa e que estes materiais exibiam expansibilidade livre quando submersos em água, desde que a tensão de recobrimento fosse inferior a 12,5 kPa; para a resistência ao corte não drenada obtiveram-se valores, regra geral, inferiores a 80 kPa, mas apenas se conseguiu obter dados de três amostras completas.

Foram ainda desenvolvidas tentativas de obtenção de correlações para algumas das propriedades índice avaliadas. Não obstante, estes ensaios parecem ter sido executados num número de amostras homogêneas insuficiente para a obtenção adequada de parâmetros de correlação, quer para os solos quer para o gabro, o que se traduz em dispersões elevadas, traduzidas por coeficientes de determinação muito baixos ou inexistentes, alerta-se por isso para o facto de os valores apresentados na tabela 5.3 se considerarem meramente indicativos. Nesta tabela não são referidos valores para o saprólito dado a dispersão obtida para este material ter sido, no geral, ainda mais elevada.

Tabela 5.3 – Correlações obtidas para alguns dos ensaios realizados e respetivos coeficientes de correlação

Zona geotécnica	Correlação	R
ZG3 Barros de Beja	$I_p = 0,43 \times w_L$	0,95
	$I_p = 1,5 \times I_s$	0,81
	$C_c = 0,006 \times (w_L - 4)$	0,78
ZG1 Gabro são	$E_{sec} = 0,66 \times \sigma_c$	0,75
	$E_{tg} = 0,67 \times \sigma_c$	0,70
	$\sigma_c = 8 \times \sigma_t$	0,39
	$\sigma_c = 20 \times I_{s(50)}$	0,52
	$\sigma_t = 2 \times I_{s(50)}$	0,94

Pretende-se com o resultado desta investigação, contribuir para o conhecimento geotécnico, obtido através da caracterização dos terrenos, no sentido de promover a melhoria dos projetos geológico – geotécnicos, bem como da sua adequação aos terrenos onde se inserem e, acima de tudo, sensibilizar as entidades decisoras regionais para a importância da caracterização geotécnica e da disponibilização de geodados no sentido de obter projetos mais económicos, sem menosprezar a

segurança no seu dimensionamento. Neste sentido considera-se importante o desenvolvimento futuro de um sistema de armazenamento de geodados, que os disponibilize e facilite o acesso à informação de caracterização e comportamento dos materiais que constituem o perfil de meteorização dos gabros, junto à área envolvente a Beja, para futura utilização em experiência comparável e sua ampliação.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Considerando que esta investigação representa apenas um contributo inicial para os conhecimentos das características geotécnicas dos solos e das rochas do Complexo Ígneo de Beja (CIB), em que apenas um reduzido número de amostras foram ensaiadas, salienta-se a importância da sua ulterior continuação, da realização de novos ensaios, recorrendo nomeadamente a ensaios *in situ*, e da aquisição do conhecimento de muitos outros parâmetros importantes que ficam por conhecer.

Apontam-se, em seguida, outras linhas de investigação que poderão vir a ser prosseguidas:

- a) Definição da ordem de grandeza do ângulo de atrito interno para o saprólito ou dos respetivos valores de condutividade hidráulica, importantes no dimensionamento e estabilidade de taludes.
- b) A caracterização da previsão de comportamento e aplicação futura dos solos residuais. O presente trabalho confirmou a existência da propensão à expansibilidade e retração na unidade ZG3, barros de Beja, e realizou tentativas de correlação entre estas propriedades e a composição químico-mineralógicas das mesmas. Estas implicações químico-mineralógicas nas propriedades geotécnicas dos barros de Beja justificam investigações continuadas e mais detalhadas que poderão até seguir no sentido de se poder averiguar se existe algum controlo geológico ou topográfico local, no quimismo desta unidade. A atual aplicação destas argilas na olaria e na construção tradicional pode também ser melhorada se estudadas as texturas mais adequadas e as correções granulométricas ideais.
- c) Quer o saprólito quer as rochas gabróicas são frequentemente solicitadas pelas obras de engenharia da região. A realização de ensaios de previsão de comportamento, como por exemplo ensaios de desgaste, podem também contribuir como uma mais-valia para promover a futura reutilização destes materiais.

- d) Ao nível do conhecimento geológico, os trabalhos de campo revelaram alguma heterogeneidade nas rochas gabróicas que importa aprofundar e cartografar mais detalhadamente. A presença de filões ácidos, essencialmente feldspáticos, de maior possança, que cortam os gabros, e que parecem estar maioritariamente localizados nas proximidades da falha da Odemira-Ávila e a ocorrência de mineralizações com hematite e magnetite, na maioria dos casos também associadas a zonas de falha, são outros dos aspetos geológicos de alguma pertinência. A presença de dioritos na bordadura sul do CIB e de granodioritos no bordo norte do mesmo, pode indiciar que os gabros se dispõem em estrutura anelar bordeada por rochas de transição, que importa averiguar.
- e) A observação de campo também revelou a heterogeneidade da distribuição espacial dos calços, quer superficial quer profunda, pelo que se reconhece como interessante o estudo mais detalhado destas formações e da sua relação com os gabros. Esse estudo deverá passar pela definição da origem e idade destes solos.
- f) Importará também intensificar o conhecimento da mobilidade química de certos elementos, recorrendo a mais determinações de DRX e FRX, como por exemplo na transferência do cálcio da rocha mãe que não se notou evidente ser para os solos residuais, mas podendo estar mais relacionada com os fenómenos de calchificação e a formação dos calços.
- g) A continuação do estudo de vários perfis de meteorização, com amostragem mais detalhada, permitirá adquirir informação sobre o enriquecimento/decaimento relativo dos vários elementos químicos, contribuindo assim para o conhecimento mais aprofundado do processo de meteorização dos gabros na região em análise.

Existe ainda muito que investigar e divulgar no âmbito da temática investigada nesta Tese. Espera-se que esta investigação venha a ser utilizada efetivamente pela comunidade técnico-científica e que seja continuada, mormente que constitua um estímulo para trabalhos futuros.

Referências bibliográficas

- AASHTO, M.-9. (2004). *Classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes. AASHTO Standard Specifications*, 8 pp.
- Aggitalis, G., Alivizatos, A., Stamoulis, D., & Stournaras, G. (1996). Correlating Uniaxial Compressive Strength With Schmidt Hardness, Point Load Index, Young's Modulus, and Mineralogy of Gabbros and Basalts (Northern Greece). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 54 (Engineering geology), 11 pp.
- Aires-Barros, L. (1978). Comparative study between rates of experimental laboratory weathering of rocks and their natural environmental weathering decay. *Bolletín of the International Association of Engineering Geology*, 18, pp. 169-174.
- Albers, A. P., Melchiades, F. G., Machado, R., Baldo, J. B., & Boschi, A. O. (2002). Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. *Cerâmica*, 48 (305), pp. 34-37.
- Alonso-Zarza, A., & Tanner, L. (2010). *Carbonates in Continental Settings - Geochemistry, Diagenesis and Applications, Developments in Sedimentology* 62. GB: Elsevier, 319 pp.
- Al-Rawas, A., Guba, I., & McGown, A. (1998). Geological and Engineering Characteristics of Expansive Soils and Rocks in Northern Oman. *Engineering Geology*, 50, pp. 267-281.
- Andrade, A. S. (1981). Sobre os três complexos gabro-dioríticos de Beja. *Boletim da Sociedade Geológica de Portugal*, XXII, pp. 73-76.
- Andrade, A. S. (1984). Sobre a originalidade (ou talvez não) do maciço de Beja no sudoeste peninsular. *Mem Not. Univeridade de Coimbra*, pp. 115-132.
- Andrade, A. S., Ferreira, A. P., & Conde, L. N. (1976). Sur la géologie du Massif de Beja: observations sur la transversale d' Odivelas. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, LX, pp. 171-202.
- Anon. (1990). Tropical Residual Soils Geological Society Engineering Group Working Party Report. 23, pp. 4-110.
- Anon. (1999). Definition of the geotechnical engineering. *Ground Engineering*, Vol 32 Nº 11, 39 pp.

- ASTM Standard 5731. (2008). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D5731-08, www.astm.org.
- ASTM Standard C97/C97M. (2009). *Standard Test Methods for absorption and bulk specific gravity of dimension stone*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2009, DOI: 10.1520/C0097_C0097M-09, www.astm.org.
- ASTM Standard D 2216. (2005). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2005, DOI: 10.1520/D2216-10, www.astm.org.
- ASTM Standard D 2435. (2004). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2004, DOI: 10.1520/D2435_D2435M-11, www.astm.org.
- ASTM Standard D 2487. (2006). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification system)*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2006, DOI: 10.1520/D2487-11, www.astm.org.
- ASTM Standard D 2845. (2008). *Standard Test for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rocks*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D2845-08, www.astm.org.
- ASTM Standard D 2974. (2000). *Standard test methods for moisture, ash and organic matter of peat and other organic soils*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2000, DOI: 10.1520/D2974-07A, www.astm.org.
- ASTM Standard D 3080. (2004). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2004, DOI: 10.1520/D3080_D3080M-11, www.astm.org.
- ASTM Standard D3282. (2009) *Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2009, DOI: 10.1520/D3282-09, www.astm.org.
- ASTM Standard D 3967. (2008). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D3967-08, www.astm.org.

- ASTM Standard D 4546. (2008). *Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Cohesive Soils*. US: ASTM International. West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D4546-08, www.astm.org.
- ASTM Standard D 5731. (2008). *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2008, DOI: 10.1520/D5731-08, www.astm.org.
- ASTM Standard D 5873. (2005). *Standard Test Method for Determination of Hardness by Rebound Hammer Method*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2005, DOI: 10.1520/D5873-05, www.astm.org.
- ASTM Standard D 7012. (2007). *Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures*. ASTM International. West Conshohocken, PA, 2007, DOI: 10.1520/D7012-10, www.astm.org.
- Aydin, A. (2008). ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 8pp.
- Aydin, A., & Basu, A. (2005). The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81, pp. 1-14.
- Bartezko, A., Delius, H., & Peching, R. (2005). Effect on compositional and structural variations on log responses of igneous and metamorphic rocks. I: mafic rocks. *Geological Society of London, Special Publications*, 240, pp. 255-278.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10, pp. 1-54.
- Bieniawski, Z. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. *Proc. In Proc. 4th International Congress of Rock Mechanics, ISRM*, pp. 41-48.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering rock mass classification*. London: John Wiley & Sons, 272 pp.
- Botelho da Costa, J. (1985). *Estudo e Classificação de Rochas por Exame Macroscópico*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 196 pp.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design - Fifth Edition*. Singapore: McGraw-Hill, 1175 pp.
- Brum Ferreira, D. (1981). Carte Geomorphologique du Portugal, escala 1:500.000. *Memória do Centro de Estudos Geológicos, Univ. Lisboa, INIC, Nº6*.

- BSI (1990) BS1377:1990. Linear Shrinkage. *Part 2, 6.5*. British Standard Institution. London.
- BSI (2003) BS EN ISO 14689-1 Geotechnical Investigation and Testing. Identification and classification of rock. British Standard Institution. London.
- Câmara Municipal de Beja. (2002). Características Geotécnicas de Solos - Estrada Beja/Salvada (não publicado).
- Cabral, J., & Ribeiro, A. (1988). Carta Neotectónica de Portugal Continental, 1:1 000 000. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal; Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa - Departamento de Geologia.
- Canilho, M. (1972). Estudo Geológico-petrográfico do maciço eruptivo de Sines. *Boletim do Museu do Laboratório Mineral. e Geológ. Fac Ciências de Lisboa, 12 Fasc 2º*, pp. 77-161.
- Canilho, M. (1989). Elementos de geoquímica das rochas do maciço ígneo de Sines. *Ciências da Terra (UNL), 10*, pp. 65-80.
- Carvalho, A. G. (2003). *Geologia Sedimentar Volume I - Sedimentogénese*. Lisboa: Âncora Editora, 444 pp.
- Carvalho-Cardoso, J. V. (1965). *Os Solos de Portugal: sua classificação, caracterização e génese; 1- A Sul do Rio Tejo*. Lisboa: Direcção Geral dos Serviços Agrícolas, 311 pp.
- CEGSA, C. d. (1999). *Muro de Suporte na Rua do Ulmo - Parecer Geológico e Geotécnico* (não publicado).
- Celestino Silva, L., Quadrado, R., & Ribeiro, L. (1970). Nota Prévia sobre a existência de uma estrutura zonada e de anortositos no maciço gabro-diorítico de Beja. *Boletim do Museu Laboratório Mineral. Geológico da Universidade de Lisboa, 11*, pp. 223-232.
- Ceryan, S. (Setembro de 2009). New approaches to evaluation of chemical weathering of rock materials for geotechnical projects. *Proceedings of the 2nd International Conference on Maritime and Naval Science and Engineering*, pp. 96-106.
- COBA. (2004). *Aeroporto de Beja, Terminal Civil, Volume 1 áreas operacionais, 1ª Fase, Projecto de Execução, Estudo Geológico e Geotécnico, Memória* (não publicado).
- Coelho, A. G. (1998). Falhas activas e casualidade sísmica em Portugal. *Simpósio sobre Catástrofes Naturais: Estudo, Prevenção e Protecção*, pp. I-1 a I-32.

- Construções Técnicas, S. (1981). *Execução de Duas Sondagens de Reconhecimento Geotécnico Junto aos Silos de Cimento do Entrepasto de Beja* (não publicado).
- da Jayawardena, U. S., & Izawa, E. (1994). A New Chemical Index of Weathering for Metamorphic Rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka. *Engineering Geology*, 36, pp. 303-310.
- Deere, D.U. & Miller, R. P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock. Tech. Report Air Force Weapons Lab., TR 65-116, Univ. of Illinois, Urbana, 299 pp.
- Dias, R. P., Pais, J., Barbosa, B., & Piçarra, J. (2006). Nova interpretação dos calcários do Cano - Casa Branca (nota preliminar). *VII Congresso Nacional de Geologia*, pp. 1-4.
- Diemer, F., Rambo, D., Specht, L. P., & Pozzobon, C. E. (2008). Propriedades geotécnicas do solo residual do basalto da região de Ijuí/RS. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, nº 12, pp. 25-36.
- Duarte, I. M. (2002). *Solos Residuais de Rochas Granitóides a Sul do Tejo - Características Geológicas e Geotécnicas*. Évora: Universidade de Évora, 373 pp.
- Duque, J., & Almeida, C. (1998). Caracterização hidroquímica do sistema aquífero dos Gabros de Beja. *CD - 164*. Consul. 11 Fevereiro de 2011, disponível em <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/164.pdf>
- Ez Eldin, M. A., Huimimg, T., & Bahwi, N. H. (2007b). Ultimate Bearing Capacity of Teschenite-Gabbro and Sandstone Rocks Foundation from Sennar Proposed Hydroelectric Power Plant, Sennar Dam, Sudan. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 2 (12), 2 (12), pp. 1756-1761.
- Ez Eldin, M. A., Huimimg, T., Bahwi, N. H., & Faraw, A. G. (2007a). Geological, Soil and Rock Mass Evaluation for Proposed Hydroelectric Power Plant at Sennar Dam, Sudan. 7 (22),. Asian Network for Scientific Information, pp. 3477-3484.
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1995). Unraveling the effects of potassium metassomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, pp. 921-924.
- Feio, M. (1952). *A Evolução do Relevo do Baixo Alentejo e Algarve - Estudo de Geomorfologia*. Alcobça: Instituto para a Alta Cultura, Centro de Estudos Geográficos, Tipografia Alcobacense, Lda, 186 pp.
- Fernandes, M. M. (2011). *Mecânica dos Solos - Introdução à Engenharia Geotécnica* (Vol. 2). FEUP Edições, Porto, 592 pp .

- Fernandes, M. M. (2006). *Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais*. Porto: FEUP Edições, Porto, 451 pp.
- FERRER, M. & VALLEJO, L. (2007). Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos. Madrid: IGME, 2ª ed., 134 p.
- Fiantis, D., Nelson, M., Shamshuddin, J., Goh, T. B., & Van Ranst, E. (2010). Determination of the Geochemical Weathering Indices and Trace Elements Content of the New Volcanic Ash Deposits from Mt. Talang (West Sumatra) Indonesia. *Eurasian Soil Science*, 43, pp. 1477-1485.
- Galopim de Carvalho, A. (2002). *Introdução ao estudo do Magmatismo e das Rochas Magmáticas*. Lisboa: Âncora Editora, 435 pp.
- GEOCIVIL. (1998). Prospeção Geotécnica da Piscina de Beja - Relatório Final (não publicado).
- GEOCIVIL. (2008). Prospeção Geológica no Local de Implantação da Escola de Ensino Básico e Pré Primário de Santiago Maior em Beja, Relatório Final (não publicado).
- Geocontrole. (1988). *Instalações Definitivas do Instituto Politécnico de Beja: Estudo geológico-geotécnico* (não publicado).
- Geocontrole. (1991). *Arruamento Urbano em Beja* (não publicado).
- Geocontrole. (1995). Escola Superior de Enfermagem de Beja, Reconhecimento Geotécnico (não publicado).
- Geocontrole. (1999). Ampliação do Hospital José Joaquim Fernandes, Beja, Reconhecimento Geotécnico (não publicado).
- Geocontrole. (2000). *Parque de Estacionamento Subterrâneo em Beja - Estudo Geotécnico* (não publicado).
- Geocontrole. (2001). Remodelação do Estádio Municipal Flávio dos Santos: Estudo Geotécnico (não publicado).
- Geocontrole. (2002a). *Centro Comunitário do Bairro da Esperança - Beja: Estudo Geotécnico* (não publicado).
- Geocontrole. (2002b). Beja - Casa Mortuária Municipal: Reconhecimento Geotécnico (não publicado).

- Geocontrolo. (2006a). *Bairro do Pelame - Beja: Estudo Geotécnico* (não publicado).
- Geocontrolo. (2006b). *Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Beja, Estudo Geotécnico* (não publicado).
- Gerard, J. (1992). *Soil geomorphology an integration of pedology and geomorphology*. Chapman & Hall, 288 pp.
- Gercek, H. (2007). Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, pp. 1-13.
- Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Process: A Practical Guide* (1st edition ed.). Blackwell Publishing, 440 pp.
- Goinhas, J. (1977). Carta Geológica de Portugal, Folha 521, Escala 1:25 000 (não publicada). *Carta Geológica de Portugal*. Lisboa: Serviço de Fomento Mineiro.
- Goldich, S. S. (1938). A Study in Rock Weathering. 46 (1), pp. 17-58.
- Gomes, C. (1988). *Argilas. O que são e para que servem*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 457 pp.
- Gomes, C. S. (2002). *Argilas: aplicações na indústria*. Aveiro: Dep. Geociências da Universidade de Aveiro, pp. 15-91.
- Gomes, R. I. (2011). *"Contributo para a caracterização geotécnica dos gabros da faixa Beringel - Beja", Dissertação para obtenção do Grau de Mestr em Engenharia Geológica (Geotécnia), Faculdade de Ciência e Tecnologia da UNL*. Lisboa, 136 pp.
- Gomes, R., Soares, S., Silva, A., Couceiro, P., & Durão, R. (2012). Parceria entre a Betoteste e o Departamento de Ciências da Terra da FCT- UNL. *RELACRE*.
- Gopala, D., & Hrishna, K. (May de 2005). Compression Wave Velocity and Index Properties of the Gabbroic Rocks Drilled at Hole 1105A of the Atlantis Bank, Southern Indian Ridge. 65, pp. 609-617.
- Harnois, L. (1988). The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55, pp. 319-322.
- Harrison, J. P., & Hudson, J. A. (2000). *Engineering Rock Mechanics, part 2: Illustrative worked examples*. Pergamon, Elsevier Ltd, 524 pp.

- Hazelton, P., & Murphy, B. (2007). *Interpreting soil tests results - what do all the numbers mean?* Sidney: NSW Government Department of Natural Resources and University of Technology Sidney, 160 pp.
- Head, K. (1982). *Manual of Soil Laboratory Testing - Volume 2: Permeability, shear strength and compressibility tests* (Vol. V 1). Cornwall: Hartnolls Limited, 747 pp.
- Head, K. H. (2009). *Manual of Soil Laboratory Testing - volume 1 - Soil classification and compaction tests* (3rd edition ed., Vol. 1). UK: 4edge Ltda, 388 pp.
- Hunt, R. E. (2007). *Characteristics of Geological Materials and Formations*. New York: CRC Press - Taylor and Francis Group, 387 pp.
- IAEG. (1979). Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1 - Rock and soil materials (IAEG Commission of engineering geological mapping). *Bulletim IAEG*, 19, pp. 364-371.
- IAEG. (1981). Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. *Report by IAEG Comission on Engineering Geological Mapping*, 24, pp. 235-274.
- IGE, I. G. (1994). 521, Beja. *Carta Militar de Portugal, Série M 888*, 1:25 000.
- IGE, I. G. (1999). 520, Ervidel (Aljustrel). *Carta Militar de Portugal, M888*, 1:25 000.
- IGE, I. G. (2000). 509 - Ferreira do Alentejo. *Carta Militar de Portugal, Série M888, escala 1:25. 000*.
- Indra, J. (2006). Mineralogy and chemical properties of residual soils. *IAEG2006*, 21, pp. 1-7.
- Isik, Y. (2006). Indirect esimation of the swelling percent and a new classification of soils depending on liquid limit and cation exchange capacity. *Engineering Geology*, 85, pp. 295-301.
- Isik, Y. O. (2011). Multiple regression, ANN (RBF, MLP) and ANFIS models for prediction of swell potential of clayey solis. *Expert systems with applications*, 38 (5), pp. 5958-5966.
- ISO FDIS 14689-1. (2003). Geotechnical Investigationand Testing - Identification and classification of rock - Part 1: Identification and description.
- ISRM. (1977). Suggested method for petroghrafic description of rocks. pp. 90-97.
- ISRM, I. S. (1977a). ISRM Suggested Method for porosoty/density determination using saturation and buoyancy techniques. (E. Brown, Ed.) *Rock Characterization Testing & Monitoring*, pp. 84-86.

- ISRM. (1977b). Suggested Method for Determination of the water Content of a Rock Sample.
- ISRM. (1978a). Suggested Method for Determination of the Schmidt Rebound Hardness. V.15 N.3.
- ISRM. (1978b). Suggested Method for Determining Sound Velocity.
- ISRM. (1978c). Suggested Method for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test. V.15 N.3.
- ISRM. (1979). Suggested Method for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials.
- ISRM. (1981). A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core. *International Journal Rock Mechanics Mining Science & Geomechanics*, 18, pp. 63-65.
- ISRM. (1981). Basic Geotechnical Description of Rock Masses. 18, 85-100.
- ISRM. (1985). Suggested Method for Determining Point Load Strength. V.22 N. 3.
- Janeiro, F. I. (2000). *Manual Técnico de Encostas*. GeoRio. Consult. 20 de Novembro de 2011, Disponível em: http://obras.rio.rj.gov.br/index.cfm?sqncl_publicacao=2
- Jesus, A. (2011). Ore Forming Systems in the Western Compartment of the Beja Layered Gabbroic Sequence (Ossa Morena Zone Portugal). *Tese de Doutoramento em Geologia (Metalogenia), Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*. Lisboa, 604 pp.
- Jesus, A. P., Munhá, J., Mateus, J., Tassinari, C., & Nutman, A. P. (2007). The Beja Layered Gabbroic Sequence (Ossa-Morena Zone, Southern Portugal): geochronology and geodynamic implications. 20 fasc. 3, pp. 139-157.
- Jesus, A., Mateus, A., Oliveira, V., & Munhá, J. (2003a). Ore forming systems in the Layered Gabbroic Sequence of the Beja Igneous Complex (Ossa Morena Zone, Portugal); state of the art and future perspectives. pp. 591-594.
- Jesus, A., Mateus, A., Waerenborgh, J., Figueiras, J., Alves, L., & Oliveira, V. (2003b). Hypogene Titanian, Vanadian Maghemite in Reworked Oxide Cumulates In The Beja Layered Gabbro Complex, Odivelas, Southeastern Portugal. *The Canadian Mineralogist*, 41, pp. 1105-1124.
- Jesus, A., Munhá, J., & Mateus, A. (2006). The Western Compartment of The Beja ayrede Gabbroic Sequence: Internal Architecture and Main Petrogenetic Features. pp. 171-174.
- Klein, C., & Dutrow, B. (2008). *Mineral Science* (23rd ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc., 675 pp.

- Liu, Z., Zhao, Y., Colin, C., Siringan, F. P., & Wu, Q. (2009). Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments. *Applied Geochemistry*, 24, pp. 2195-2205.
- LNEC. (1974). *Carta Geotécnica da Área de Sines*. Estudo Realizado para o Gabinete da Área de Sines, Lisboa, 32 pp.
- LNEC E 195. (1966). Solos - Preparação por via secade amostras para ensaios de identificação. Lisboa: LNEC.
- LNEC E-196. (1966). Solos - Análise Granulométrica. Lisboa: LNEC.
- LNEC E-197, L. (1966). Solos - Ensaio de Compactação. Lisboa: LNEC.
- LNEC E-240. (1970). Solos - Classificação para Fins Rodoviários. Lisboa: LNEC.
- LNEG, L. (2010). *Carta Geológica de Portugal na escala 1:1 000 000. 3ª Edição*. Lisboa.
- Look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design*. Francis & Taylor Group, London, 332 pp.
- Lotze, F. (1945). Zur gliederung der Variscides der Iberischen Meseta. *Geotektonische Forschungen*, 6, pp. 78-92.
- MacKenzie, W. S., & Guilford, C. (1996). *Atlas of rock-forming minerals in thin section* (10th ed.). England: Addison Wesley Longman Limited, London, 98 pp.
- MacKenzie, W., Donaldson, C. H., & Guilford, C. (1982). *Atlas of igneous rocks and their textures*. England: Pearson Education Limited, London, 148 pp.
- MAGUE, C. M. (1964). *Estudo de Fundações de Hangares na Base Aérea 11 - Beja* (não publicado).
- Mateus, A., Jesus, A., Conceição, P., Oliveira, V., & Rosa, C. (2001). Natureza mineralógica e geoquímica das mineralizações sulfuretadas em gabro do Complexo Ígneo de Beja; algumas questões relativas à sua génese. *VI Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, XII Semana de Geoquímica*, pp. 125-129.
- Mateus, A., Munhá, J., & Jesus, A. (2010). Minerallizações Associadas à Sequência Gabróica Bandada do Complexo Ígneo de Beja. In J. M. Neiva, A. Ribeiro, M. Victor, F. Noronha, & M. Ramalho, *Ciências Geológicas - Ensino e Investigação e sua História* (Vol. II). Associação Portuguesa de Geólogos e Sociedade Geológica de Portugal, Lisboa, pp. 37-46

- Mayne et al, C. e. (2001). Manual of subsurface Investigations .Consult. 23 de Março de 2011, disponível em <http://geosystems.ce.gatech.edu/Faculty/Mayne/papers/NHI%202002%20Subsurface%20Investigations.pdf>
- Mineiro, A. C. (1994). Avaliação do potencial de liquefação sísmica de solos. O risco de insucesso com métodos "acreditados". Os ensinamentos da barragem de Al Wahda em Marrocos. 2º Encontro sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, 43 pp.
- Morgenstern, N. R. (2000). Common ground. *Proc. International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, GeoEng2000, 1*, pp. 1-30.
- Mylavarapu, R. (2009). UF/IFAS Extension Soil Testing Laboratory (ESTL) Analytical Procedures and Training Manual. Circular 1248, Soil and Water Science Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Nadeau, P., Wilson, M., McHardy, W., & Tait, J. (1984). Interparticle diffraction: a new concept for interstratified clays. *Clay minerals*, 19, pp. 757-769.
- Nash, D. J., & Smith, R. F. (1998). Multiple Calcrete Profiles in the Tabernas Basin, Southeast Spain: their origins and geomorphic implication. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, pp. 1009-1029.
- Nesbitt, H. W., & Young, G. M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 48, pp. 1523-1534.
- Ng, C. .., Guan, P., & Shang, Y. J. (2000). Weathering mechanisms and indices of the igneous rocks of Hong Kong, 19 pp.
- Ng, C. W., Guan, P., & Shang, Y. J. (2001). Weathering mechanisms and indices of the igneous rocks of Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, pp. 133-151.
- NP 143. (1969). Solos - Determinação dos Limites de Consistência. IPQ.
- NP 83. (1965). Solos - Determinação da Densidade das Partículas. IPQ.
- NP 84. (1965). Solos - Determinação do Teor em Água. IPQ.

- NP EN 1998-1, 2. (2010). Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras Gerais, Acções sísmicas e regras para edifícios. *Norma Portuguesa*. Caparica: Instituto Português da Qualidade, 230 pp.
- NP EN, 1. -1. (2010). *Norma Portuguesa; Eurocódigo 7 - Projecto Geotécnico; Parte 1 : Regras gerais*. Caparica: Instituto Português da Qualidade, 179 pp.
- Nunes, A., & Saião, A. L. (2011). 2º Seminário. *Estabilização de Taludes em Solos e Rochas - Experiência Brasileira e Casos de Obra Portugueses*. Capítulo 2 - Rochas e solos do Rio de Janeiro. 13 e 14 de Outubro de 2011. FEUP: Porto, 48 pp.
- Oliveira, J. T. Coordenação (1988). Carta Geológica de Portugal, Folha 8, escala 1:200 000. *Carta Geológica de Portugal*. Lisboa: Serviço Geológico de Portugal.
- Oliveira, J. T. Coordenação (1992). Notícia Explicativa da Folha 8 da Carta Geológica de Portugal, 1:200 000. *Carta Geológica de Portugal*. Lisboa: Serviço Geológico de Portugal, 85 pp.
- Oliveira, R., & Gomes, C. C. (2003). Carta Geotécnica do Porto. Volume I - Memória e desenhos, Tomo 1 - Memória. Câmara Municipal do Porto, Porto, 159 pp.
- Oliveira, R., Delgado Rodrigues, J., & Gomes Coelho, A. (1978b). Estudos Geológicos e Geotécnicos para o Porto de Sines. In S. P. Geotecnia (Ed.), 24, Lisboa, pp. 55-71.
- Oliveira, R., Rodrigues, J. D., & Coelho, A. G. (1978a). Engineering Geological Studies For The Sines Harbour (Portugal). *Memória nº 512*, p. 12.
- OPCA, D. d. (2002). *Relatório Geológico-Geotécnico, Parque de Estacionamento na Av. Miguel Fernandes, Beja*, (não publicado).
- Parker, A. (1970). An index of weathering for Silicate Rocks. *Geology Magazine*, pp. 501-504.
- Pastore, E. L. (1995). Weathering Profiles. *Volume I*, pp. 353-364.
- Pedro, J., Araújo, A., Fonseca, P., & Munhá, J. (2005). Sequências ofiolíticas internas da Zona de Ossa-Morena: implicações geodinâmicas na evolução da Cadeia Variscobélica. *Cadernos Lab. Xeológico de Laxe*, 30, pp. 235-258.
- Pedro, J., Moita, P., Araújo, A., Fonseca, P., & Munhá, J. (2006). Evolução Tectonomagmática da Zona de Ossa-Morena Durante o Ciclo Varisco: estará o ciclo de J. Tuzo Wilson completo? (V. C. Geologia, Ed.), 4 pp.

- Peralta, E. (2001). *Hidrogeologia e Modelação Estocástica da Contaminação por Nitratos do Aquífero Gabro-diorítico da Região de Beja*. Tese de Mestrado em Georrecursos (Hidrogeologia), Instituto Superior Técnico/Centro de GeoSistemas, Lisboa, 157 pp.
- Pimentel, N. L., Wright, V. P., & Azevedo, T. M. (1996). Distinguishing early groundwater alteration effects from pedogenesis in ancient alluvial basins: examples from Palaeogene of southern Portugal. *Sedimentary Geology*, 105, pp. 1-10.
- Pin, C., Paquette, J. L., & Fonseca, P. (1999). 350 MA (U- Pb zircon) igneous emplacement age and Sr-Nd isotopic study of the Beja Gabbroic Complex (S. Portugal). (J. A. Gaméz, L. Eguilluz, & T. Palácios, Edits.) X, pp. 190-194.
- Price, J. R., & Velbel, M. A. (2003). Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202, pp. 397-416.
- Quesada, C. (2006). The Ossa-Morena Zone of the Iberian Massif: a tectonostratigraphic approach to its evolution (Die Ossa-Morena Zone des Iberischen Massivs: ein tektonostratigraphischer Ansatz zu ihrer Entwicklung). *Z. dt. Ges. Geowiss.*, 157, pp. 585-595.
- Quesada, C., Romero, I., Capote, R., Tejero, R., & Lunar, R. (2006). Magma emplacement in transpression: The Santa Ollala Igneous Complex (Ossa-Morena Zone, SW Iberia). *Journal of Structural Geology*, 28, pp. 1821-1834.
- Read, J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for Open Pit Slope Design*. (C. Publishing, Ed.) CRC Press, Balkema Book, 512 pp.
- Rio Narcea, G. M. (2004). *Projecto de Beja, Relatório do Segundo Semestre de 2004, Não publicado, consulta local LNEG Beja*.
- Rio Narcea, G. M. (2008). *Projecto de Beja, Relatório Final de Actividades, Não publicado, Consulta local no LNEG Beja*.
- Ruxton, B. p. (1968). Measures of the Degree of Chemical Weathering Rocks. *J. Geol.*, 76, pp. 518-527.
- Sabatini, P., Bachus, R., Mayne, P., Schneider, J. A., & Zettler, T. E. (2002). *Geotechnical Engineering Circular no.5 Evaluation of Soil and Rock Properties*. Washington DC: U.S. Department of Transportation. Office of Bridge Technology, Federal Highway Administration, 266 pp.

- Sakharov, B., Lindgreen, H., Salyn, A., & Drits, A. (1999). Determination of illite-smectite structures using multispecimen X-ray diffraction profile fitting. *Clays and clay minerals*, V. 47 N. 5, pp. 555-566.
- Santos Correia, A. A. (2003). *Projecto Geológico-Geotécnico Beja Parque Hotel* (não publicado).
- Santos, J. F. (1990). Petrologia do Sector Ocidental da Unidade de Odivelas (Maciço de Beja). *Trabalho realizado no âmbito das provas de aptidão pedagógica e capacidade científica, ao abrigo do Artº 58 do Decreto - lei 19/80*, Aveiro, 226 pp.
- Santos, J. F., Andrade, A. S., & Munhá, J. M. (1990). Magmatismo Orogénico Varisco no Limite Meridional da Zona de Ossa - Morena. *Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal*, t. 76, pp. 91-124.
- Serrabritas - Comércio de Inertes, c. c. (2001). *Plano de Pedreira, Exploração a Céu Aberto da Pedreira nº 5206 "Monte da Serra"* (não publicado).
- Silva, A. P. (2010/2011). Mecânica das rochas, notas de aula, FCT-UNL.
- Silva, A.P.F. (2003), Cartografia geotécnica e o sistema de informação Geo-Almada. Tese para a obtenção do grau de Doutor em Geotecnia (Geologia de Engenharia), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2 vols.
- Silveira, L. L. (2002). Elaboração de carta de susceptibilidade à erosão das bacias dos rios Araquara e Cubatão - SP, escala 1:50 000. *Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*, I. São Paulo, 187 pp.
- Simão, J. A. (2003). *Rochas ígneas como pedra ornamental - causas, condicionantes e mecanismos de alteração. Implicações tecnológicas. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, especialidade de petrologia e geoquímica*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa Faculdade de Ciências e Tecnologia, 182 pp.
- Smith, I. (2006). *Smith's elements of soil mechanics* (8th edition ed.). UK: Blackwell Publishing, 538 pp.
- Smith, M. R., & Collis, L. (. (2001). *Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*. London: Geological Society, Engineering geology special publication.
- Soares, S. M. (2011). Ensaio inéditos de compactação Proctor, ESTIG- IPBeja, (não publicado).

- Soares, S. M., & Ferreira, A. (Dezembro de 2006). Contribuição para o conhecimento geotécnico dos solos da cidade de Beja. *Revista de Engenharia CIT*, 2, pp. 77-80.
- Soares, S., Cardoso, C., Faria, P., & Silva, A. (2010). The importance of geotechnical knowledge of terrains: Beja municipality, Alentejo, Portugal. In V. Petrukhin, V. Ulitsky, I. Kolybin, M. Lisyuk, & M. Kholmyansky (Ed.), *Proceedings of the International Geotechnical Conference - Geotechnical Challenges in Megacities*, 2, Moscow, pp. 568-571.
- SOPECATE, S. d. (1994). *Prospecção Geotécnica para Residência de Estudantes, Beja, Relatório Geotécnico* (não publicado).
- SOPECATE, S. d. (2008). Remodelação da Escola Secundária D. Manuel I, Beja - relatório Geotécnico (não publicado).
- SOPER, S. L.-I. (1998). *Conservatório Regional do Baixo Alentejo, Novas Instalações, Beja, Reconhecimento Geotécnico e Estrutural* (não publicado).
- Souri, T., Watanabe, M., & Sakagami, K. (2006). Contribution of Parker and Product Indexes to Evaluate Weathering Condition of Yellow Brown Forest Soils in Japan. *Geoderma*, 130, pp. 346-355.
- Streckeisen, A. (1976). Classification of the common igneous rocks by means of chemical composition: a provisional attempt. 1, pp. 1-15.
- Sulaqua, S. e. (2004). *Relatório Final de Furo Campus Instituto Politécnico de Beja* (não publicado).
- Sultan, K. (2006). Clay mineralogy of Central Victorian (Creswick) soils: clay mineral contents as a possible tool of environmental indicator. L. Taylor & Francis Group, Ed. *Soil & Sediment Contamination*, 15, pp. 339-356.
- Taboada, T., Garcia, C., Martínez-Cortizas, A., Nóvoa, J., Pontevedra, X., & García-Rodeja, E. (2007). Chemical weathering of reference european volcanic solis. In *Soils of Volcanic Regions in Europe*, Springer, pp. 307-323.
- Teixeira Duarte, S. (1963). Parecer Sumário Sobre as Condições Hidrogeológicas de um terreno da "Soturis", próximo de Beja (não publicado).
- Teixeira Duarte, S. (1966). Reconhecimento Geotécnico Edifício nº 320 da Base Aérea de Beja (não publicado).
- Teixeira Duarte, S. (1967). Estudo Geotécnico BP cidade de Beja (não publicado).

- Teixeira Duarte, S. (1983). *Centro Regional de Segurança Social de Beja, Relatório de Reconhecimento Geotécnico* (não publicado).
- Teixeira Duarte, S. (1995). Relatório de Reconhecimento Geotécnico: Novo Edifício da Direcção de Estradas de Beja (não publicado).
- Teixeira Duarte, S. (1999). Instituto Português da Juventude, Casa da Juventude de Beja, Reconhecimento Geotécnico (não publicado).
- Terzaghi K., Peck R. B., Mesri G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley & Sons, 3rd edition, 592 pp.
- Torre de Assunção, C., & Garrido, J. (1953). Tables pour la détermination des minéraux au moyen des rayons X. *Bulletin du Musée et Laboratoire Minéralogique et Géologique de la Faculté des Sciences de Lisbonne*, 20-21, 45 pp.
- UNE 103 601. (1996). Ensayo del Hinchamiento libre de un suelo en edómetro. Madrid: AENOR.
- UNE 22-950. (1990). Propiedades mecánicas de las rocas - Ensayos para la determinación de la resistencia Parte 3 - Determinación del módulo de elasticidad (Young) y del coeficiente de Poisson. Madrid: AENOR.
- Universidade de Aveiro, D. d. (1998). *Relatório de Progresso, Prospeção Geofísica Aplicada à Arqueologia, Logradouro do Conservatório Regional do Baixo Alentejo* (não publicado).
- Vallejo, L. I., & Ferrer, M. (2011). *Geological Engineering*. CRC Press Balkema Group, 678 pp.
- Vargas, M. (1974). Engineering Properties of Residual Soils from South-Central Region of Brazil. 2nd Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geol., São Paulo, Brazil, *volume 1*, pp. 5.1-5.26.
- Vaz, L. (1996). Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rochas em Regiões Tropicais. (ABMS/ABGE, Ed.) *Revista de Solos e Rochas*, 19 (Solos e Rochas), pp. 117-136.
- Velde, B., & Meunier, A. (2008). *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks*. Berlin Heidelberg: Springer - Verlag, 406 pp.
- Viana da Fonseca, A. (Setembro de 1996). Geomecânica dos solos residuais do granito do Porto. Critérios para dimensionamento de fundações directas. *Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, Porto: FEUP, 774 pp.

- Vogt, T. (1927). Sulitjelmafeltets geologi og petografi. *Norges Geologiske Undersokelse*, 121, pp. 1-560.
- Walkley, A., & Black, J. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, pp. 29-38.
- Walkley, A., & Black, J. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, pp. 29-38.
- Wesley, D. (2010). *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 431 pp.
- Xian-Qin, H., & Cruden, D. (1992). a portable tilting table for on-site tests of the friction angles of discontinuities in rock masses. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 46, pp. 59-62.
- Zuquette, L., & Gandolfi, N. (2004). *Cartografia Geotécnica*. São Paulo: Oficina de Textos, 190 pp.

ANEXOS

Anexo I

Anexo I – Listagem dos relatórios geológico-geotécnicos consultados

Projeto	Localização (Sistema WGS84)	Tipo de informação	Data	Autor
Hangares Base Aérea nº11	N38°04'57,73" W007°55' 21,79"	Resultados de ensaios SPT	1964	MAGUE
Zona Residencial de Beja	Não apuradas		Novembro 1964	CANIFA
Edifício 320 Base Aérea	N38°04'17,31" W007°55' 20,02"		Outubro 1966	Teixeira Duarte
BP	N38°0' 36,78" W007°51' 51,27"		Setembro 1967	Teixeira Duarte
Silos de cimento do entrepósito de Beja	N38°1' 23,22" W007°51' 11,98"		Setembro 1981	Construções Técnicas, SARL
Centro Regional Seg. Social*	N38°00'31,80" W007°51' 22,10"		Agosto 1983	Teixeira Duarte
Inst. Politécnico de Beja	N38°00'45,96" W007°52' 22,73"		Junho 1988	Geocontrolo
Arruamento urbano Beja	N38°0 18,12" W007°51' 38,94"	Classificação solos/ ensaios Proctor e CBR	Agosto 1991	Geocontrolo
Residência de Estudantes IPB	N38°00'47,20" W007°52' 18,91"	Resultados de ensaios SPT	Maio 1994	SOPECATE
Edifício da JAE	N38°00'03,82" W007°52' 01,33"		Abril 1995	Teixeira Duarte
Escola Superior de Saúde	N38°00'40,71" W007°52' 26,41"		Julho 1995	Geocontrolo
Pingo Doce	N38°00'42,09" W007°51' 57,89"		Outubro 1997	Belbetões
Piscina Coberta	N38°00'38,12" W007°52' 32,40"		Abril 1998	Geocivil


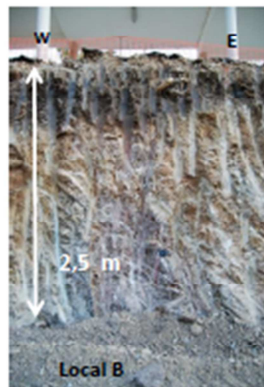

Projeto	Localização (Sistema WGS84)	Tipo de informação	Data	Autor
Conservatório CRBA	N38°00'55,50" W007°51' 55,69"	Resultados de ensaios SPT	Fevereiro 1998	SOPER
Conservatório CRBA*	N38°00'55,50" W007°51' 55,69"	Geofísica	Julho 1998	Universidade Aveiro
Barragem do Pisão*	N38°04'03,85" W007°59' 11,22"	Ensaios solos e rochas	Fevereiro 1999	GEOP e Geocontrolo
IPJ	N38°00'25,81" W007°51' 28,39"	Resultados de ensaios SPT	Maio 1999	Teixeira Duarte
Hospital Joaquim Fernandes	N38°00'52,69" W007°52' 11,22"		Julho 1999	Geocontrolo
Muro Rua do Ulmo	N38°00'50,76" W007°51' 44,43"	Ensaios solos/PDL	Setembro 1999	CEGSA
Parque Casa da Cultura	N38°00'39,75" W007°51' 38,50"	Resultados de ensaios SPT	Março 2000	Geocontrolo
Estádio Flávio dos Santos	N38°00'26,14" W007°51' 40,41"		Março 2001	Geocontrolo
Casa Mortuária Beja	N38°01'16,19" W007°52' 15,59"		Abril 2002	Geocontrolo
Bairro da Esperança	N38°01'09,30" W007°50' 56,23"		Abril 2002	Geocontrolo
Estrada Salvada-Beja	N38°00'04,20" W007°50' 55,25"	Ensaios solos	Outubro 2002	Estradas de Portugal
Beja Parque Hotel	N38°00'36,16" W007°52' 26,81"	Resultados de ensaios SPT	Junho 2003	LGM C - CICCOPN
Parque Av. Miguel Fernandes	N38°00'55,52" W007°52' 01,46"		Março 2003	OPCA
ESTIG 1ª Fase	N38°01'03,77" W007°51' 34,68"		Agosto 2004	Geocontrolo

Projeto	Localização (Sistema WGS84)	Tipo de informação	Data	Autor
Captações subterrâneas EMAS*	N38°00'32,45" W007°52' 23,69"	Perfil do subsolo	2005	EMAS
Bairro do Pelame	N38°00'52,19" W007°51' 03,11"	Resultados de ensaio SPT	Março 2006	Getecno- Geocontrolo
Escola D. Manuel I	N38°00' 27,31" W007°51' 56,62"	Resultados de ensaio SPT e PDL	Abril 2008	SOPECATE
ESTIG 2ª fase	N38°00'57,25" W007°52' 32,27"		Agosto 2009	Geocontrolo
Lar Patronato Sto. António	N38°01'12,07" W007°51' 54,28"	Resultados de ensaio SPT	Julho 2010	Geocontrolo

Nota: os relatórios assinalados com * não incluem registos de sondagens

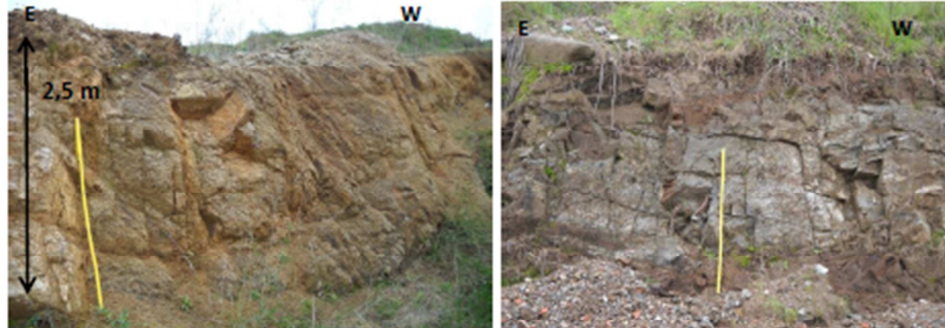
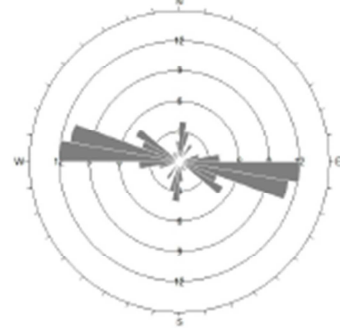
Anexo II

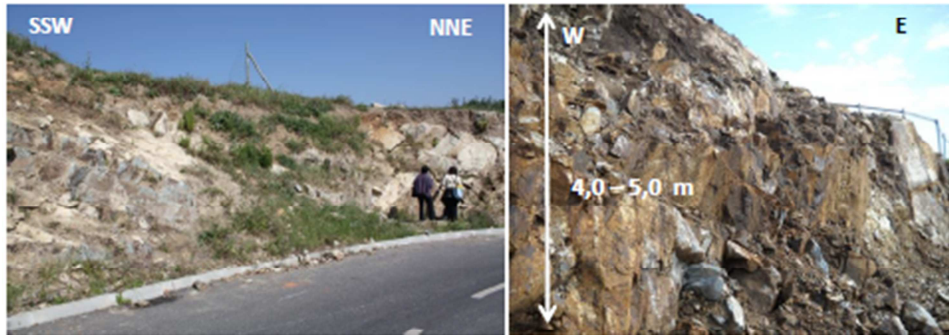
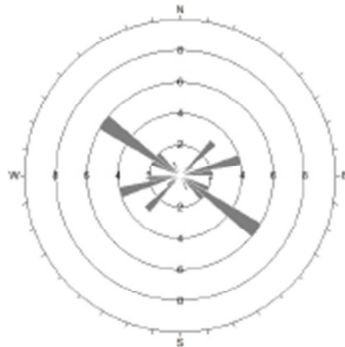
Anexo II – Exemplos dos levantamentos de campo e respetivos perfis

Designação/localização: D. Manuel I (Beja)		Coordenadas: (WGS 84) N38°0,441' W007° 52,009'			Data: 6/11/2008		Notas:	
Litologia: Gabros, aterro antrópico				Formação: SGB		Acesso mt dificultado pela obra		
Formações superficiais: O gabro típico, de grão fino a médio e melanocrata, mt fraturado e meteorizado (W4-W5) passando a saprólito				Espessuras: aterro com 1,0 a 1,5 m		Local A - Muito calizo. Rocha muito meteorizada (W4-5), muito fraturada e com falhas com preenchimento de calizo e argilas.		
Estrutura (dobras, falhas, fraturas,...) Maciço mt fraturado e meteorizado localmente com calizos			Orientação espacial das fraturas (principais): 310/74 250/66 70/62					Local B - Menos filões de calizo, zona de grande oxidação. Identificou-se uma zona mineralizada, com óxidos de Fe e Mn, e que tem junto um filão cor de jaspe, muito mole e alterado.
Resistência Esclerómetro (R)		(não se efetuou)						
Espaçamento		F1 > 200cm	F2 60-200cm	F3 20-60 cm	F4 6 a 20cm	F5 < 6cm X		
Abertura		nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1,0mm	1-5 mmX	> 5 mm		
Continuidade		Muito baixa <1m	Baixa 1-3m X	Méd 3-10m	Alta 10-20m	Muito alta > 20m		
Presença de água		Seco X	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água		
Grau de meteorização		Sã W1	Pouco meteorizada W2	Medianamente meteorizada W3	Muito meteorizada w4 X	Decomposto W5 X		
Resistência matriz rochosa		Extrem. branda Unha 0	Muito branda Navalha 1 X	Branda Ponta do martelo 2	Média Golpe de martelo 3	Dura + 1 golpe de martelo 4	Muito dura Vários golpes martelo 5	
Ângulo atrito		> 45°	40° - 45°	35° - 40°	30° - 35°	<30°		
Esboço (orientado)								Amostras:
								Amostras de saprólito de dois locais de escavação (A e B)
								


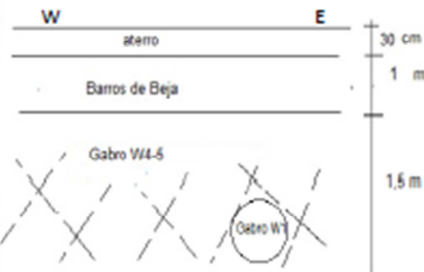
Designação/localização: Pilarsol (Beja)		Coordenadas: (WGS 84) N38°0,343' W007° 51,541'		Data: 21/05/2007		Notas:	
Litologia: Gabros, barros de Beja e aterro antrópico				Formação: SGB		Gabro com fácies diferente. Filões de feldspato; ortoclase intacta e tb transformada em argila. Visível alinhamento no gabro. Sem água visível embora este local seja junto ao poço onde os bombeiros abastecem. Até profundidade escavada não era visível a rocha sã.	
Formações superficiais: O gabro típico, de grão fino a médio e melanocrata com zonas mais escuras e ferruginosas, fraturado e meteorizado (W4) passando a saprólito com blocos de gabro são. Calíços.				Espessuras: aterro aprox. 15 cm; barros aprox. 30 cm			
Estrutura (dobras, falhas, fraturas,...)		Orientação espacial das fraturas (principais): 180/82 90/70 200/80					
Maciço fraturado e meteorizado, com blocos sãos e localmente com calíços							
Resistência	(não se efetuou)						
Esclerómetro (R)							
Espaçamento	F1 > 200cm	F2 60-200cm	F3 20-60 cm	F4 6 a 20cm X	F5 < 6cm		
Abertura	nenhuma	< 0,1 mm	0,1 – 1,0mm	1-5 mmX	> 5 mm		
Continuidade	Muito baixa <1m	Baixa 1-3m X	Méd 3-10m	Alta 10-20m	Muito alta > 20m		
Presença de água	Seco X	Água intersticial	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água		
Grau de meteorização	Sã W1	Pouco meteorizada W2	Medianamente meteorizada W3	Muito meteorizada w4 X	Decomposto W5		
Resistência matriz rochosa	Extrem. branda Unha 0	Muito branda Navalha 1 X	Branda Ponta do martelo 2 X	Média Golpe de martelo 3	Dura + 1 golpe de martelo 4	Muito dura Vários golpes martelo 5	Extrem. Dura Risca 6
Ângulo atrito	> 45°	40° - 45° X	35° - 40°	30° - 35°	<30°		
Esboço (orientado)							
Amostras:							
Amostra de saprólito							

Designação/localização: Canal de adução (Beringel)		Coordenadas: (WGS 84) N38°2,965' W07°57,646'		Data: 23/11/2010		Notas:	
Litologia: Gabros, barros de Beja, calicho e saprólito				Formação: SGB		Falha no gabro – atitude 330/54. Gabro com textura mais fina e escura (mais ferruginoso). Presença de zonas de serpentinização. O avanço da vala para S chegou a atingir 11m de profundidade e necessitou de recorrer a explosivos para desmonte do material.	
Formações superficiais: O gabro típico, de grão fino a médio e melanocrata coberto por barros de Beja e calicho.				Espessuras: 30-50 cm barros de Beja; máximo 3,0 m calicho			
Estrutura (dobras, falhas, fraturas,...) Fraturas com presença de água- aspeto ferruginoso (cor alaranjada). Alteração em bolas e em "casca de cebola". Rocha mt meteorizada (W5) e blocos de gabro são (W1-W2). Localmente filonetes de quartzo e feldspato com dimensões inferiores a 10 cm. Falhas. Mt preenchimento carbonatos		Orientação espacial das fraturas (exemplo): N-S; subvertical 40/72 300/80 194/70 82/70 296/82 (28 planos levantados)					
Resistência Esclerómetro (R)	(ver tabela própria)						
Espaçamento	F1 > 200cm	F2 60-200cm	F3 20-60 cm X	F4 6 a 20cm X	F5 < 6cm		
Abertura	nenhuma	< 0,1 mm X	0,1 – 1,0mm	1-5 mm	> 5 mm		
Continuidade	Muito baixa <1m	Baixa 1-3m	Méd 3-10m X	Alta 10-20m	Muito alta > 20m		
Presença de água	Seco	Água intersticial	Húmido X	Escorrimentos	Entrada de água		
Grau de meteorização	Sã W1 X	Pouco meteorizada W2 X	Medianamente meteorizada W3	Muito meteorizada w4	Decomposto W5 X		
Resistência matriz rochosa	Extrem. Branda Unha 0	Muito branda Navalha 1	Branda Ponta do martelo 2	Média Golpe de martelo 3	Dura + 1 golpe de martelo 4	Muito dura Vários golpes martelo 5	Extrem. Dura Risca 6 X
Ângulo atrito	> 45°	40° - 45° X	35° - 40°	30° - 35°	<30°		
Esboço (orientado)							
						Amostras: Amostras de barros de Beja, 17,18 e 19 Amostra de rocha 31 (vários blocos)	

Designação/localização: Saibreira (Beja)		Coordenadas: (WGS 84) N38°1,813' W07°51,968'			Data: 2/04/2011		Notas:	
Litologia: Gabros, aterro antrópico				Formação: SGB		Filão de feldspato (ortoclase) no gabro – atitude 10/40, 30 cm espessura. Junto ao filão parece haver uma pequena zona de cisalhamento. Gabro L0F4S2A2 Gabro L0F4S4A2		
Formações superficiais: O gabro típico, de grão fino a médio e melanocrata coberto por aterro. Gabro são (W1) e gabro meteorizado (W2,W3)				Espessuras: aterro antrópico em crescimento				
Estrutura (dobras, falhas, fraturas,...) Fraturas localmente com aspeto ferruginoso. Alteração em bolas. Rocha pouco meteorizada (W2) e blocos de gabro são (W1).				Orientação espacial das fraturas (exemplos): 30/80 10/80 190/80 100/50 280/30 290/25 180/80 (levantados 51 planos)				
Resistência Esclerómetro (R)		(ver tabela própria)						
Espaçamento	F1 > 200cm	F2 60-200cm	F3 20-60 cm X	F4 6 a 20cm X	F5 < 6cm			
Abertura	nenhuma	< 0,1 mm	0,1 – 1,0mm X	1-5 mm	> 5 mm			
Continuidade	Muito baixa <1m	Baixa 1-3m X	Méd 3-10m	Alta 10-20m	Muito alta > 20m			
Presença de água	Seco	Água intersticial X	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água			
Grau de meteorização	Sã W1 X	Pouco meteorizada W2 X	Medianamente meteorizada W3X	Muito meteorizada w4	Decomposto W5			
Resistência matriz rochosa	Extrem. branda Unha 0	Muito branda Navalha 1	Branda Ponta do martelo 2 X	Média Golpe de martelo 3	Dura + 1 golpe de martelo 4	Muito dura Vários golpes martelo 5 X	Extrem. Dura Risca 6	
Ângulo atrito	> 45°	40° - 45° X	35° - 40°	30° - 35°	<30°			
Esboço (orientado)						Amostras:		
								
						Amostra de rocha 32 (vários blocos) com W2 e W1		

Designação/localização: Colina do Carmo (Beja)		Coordenadas: (WGS 84) N38°1,671' W007° 51,086'		Data: 10/12/2010		Notas:	
Litologia: Granodiorito				Formação: SGB		Falhas: N360/40N e 70/70	
Formações superficiais: Granodiorito parcialmente coberto por aterro antrópico lançado (lixreira)				Espessuras: aterro 15 cm no local observado		Fraturas preenchidas por argilas	
Estrutura (dobras, falhas, fraturas,...) Maciço fraturado e pouco meteorizado, localmente atravessado por falhas, zonas de mineralizações				Orientação espacial das fraturas (principais): 310/60 110/10 220/80 330/subv (leitura de 21 planos)		Há zonas mais fraturadas, com espaçamento 10-15 cm, normalmente associadas a falhas, e onde se identificam mineralizações (goethite, malaquite?, hematite)	
Resistência Esclerómetro (R)	(não se efetuou)						
Espaçamento	F1 > 200cm	F2 60-200cmX	F3 20-60 cm	F4 6 a 20cm	F5 < 6cm		
Abertura	nenhuma	< 0,1 mm	0,1 – 1,0mm	1-5 mm	> 5 mm X		
Continuidade	Muito baixa <1m	Baixa 1-3m	Méd 3-10m X	Alta 10-20m	Muito alta > 20m		
Presença de água	Seco X	Água intersticial	Húmido	Escorridos	Entrada de água		
Grau de meteorização	Sã W1 X	Pouco meteorizada W2	Medianamente meteorizada W3	Muito meteorizada w4	Decomposto W5		
Resistência matriz rochosa	Extrem. branda Unha 0	Muito branda Navalha 1	Branda Ponta do martelo 2 X	Média Golpe de martelo 3	Dura + 1 golpe de martelo 4	Muito dura Vários golpes martelo 5	Extrem. Dura Risca 6 X
Ângulo atrito	> 45°	40° - 45° X	35° - 40°	30° - 35°	<30°		
Esboço (orientado)						Amostras:	
						Amostra para lâmina delgada e blocos	
							

Designação/localização: Lar Patronato (Beja)		Coordenadas: (WGS 84) N38°1,210' W007° 51,900'			Data: 6/04/2011		Notas:		
Litologia: Gabro, granodiorito					Formação: SGB			Acesso mt dificultado pela obra em curso.	
Formações superficiais: O gabro típico, de grão fino a médio e melanocrata e granodiorito. Zona cortada por falhas					Espessuras: não foi visível a camada de cobertura				Obra atravessada por várias falhas (128/82; 210/88) e contactos. Observou-se o contacto entre o gabro, mais fraturado e oxidado, e o granodiorito são, com > espaçamento de fraturas.
Estrutura (dobras, falhas, fraturas,...) Fraturas localmente oxidadas e mineralizadas. Presença de filão de carbonatos na zona de falha, 30 cm espessura.			Orientação espacial das fraturas (principais): 180/60 50/54 260/20						
Resistência Esclerómetro (R)		(não se efetuou)							
Espaçamento	F1 > 200cm	F2 60-200cm	F3 20-60 cm X		F4 6 a 20cm X	F5 < 6cm X			
Abertura	nenhuma	< 0,1 mm	0,1 – 1,0mm X	1-5 mm		> 5 mm			
Continuidade	Muito baixa <1m	Baixa 1-3m X	Méd 3-10m	Alta 10-20m		Muito alta > 20m			
Presença de água	Seco X	Água intersticial		Húmido	Escorrimentos		Entrada de água		
Grau de meteorização	Sã W1 X	Pouco meteorizada W2	Medianamente meteorizada W3 X		Muito meteorizada w4		Decomposto W5		
Resistência matriz rochosa	Extrem. branda Unha 0	Muito branda Navalha 1 X	Branda Ponta do martelo 2	Média Golpe de martelo 3	Dura + 1 golpe de martelo 4		Muito dura Vários golpes martelo 5 X	Extrem. Dura Risca 6	
Ângulo atrito	> 45°		40° - 45°	35° - 40°		30° - 35°	<30°		
Esboço (orientado)									Amostras:
									Amostras de blocos de gabros

Designação/localização: Vala EMAS (Beja)		Coordenadas: (WGS 84) N38°1,170' W007° 52,583'		Data: 20/07/2008		Notas:	
Litologia: Gabros, barros de Beja, aterro antrópico				Formação: SGB		Acesso mt dificultado pela obra	
Formações superficiais: O gabro típico, de grão fino a médio e melanocrata, mt fraturado e meteorizado (W ₄₋₅), com blocos pequenos são				Espessuras: ver figura abaixo			
Estrutura (dobras, falhas, fraturas,...)		Orientação espacial das fraturas (exemplos): 330/76 90/62 74/84 50/40 200/40 270/60					
Fraturas localmente com aspeto ferruginoso. Alteração em bolas. Rocha meteorizada (W4) e bolas de gabro são (W1).							
Resistência Esclerómetro (R)	(não se efetuou)						
Espaçamento	F1 > 200cm	F2 60-200cm	F3 20-60 cm X	F4 6 a 20cm	F5 < 6cm X		
Abertura	nenhuma	< 0,1 mm	0,1 – 1,0mm X	1-5 mm	> 5 mm		
Continuidade	Muito baixa <1m X	Baixa 1-3m	Méd 3-10m	Alta 10-20m	Muito alta > 20m		
Presença de água	Seco X	Água intersticial	Húmido	Escorrimientos	Entrada de água		
Grau de meteorização	Sã W1 X	Pouco meteorizada W2	Medianamente meteorizada W3	Muito meteorizada w4	Decomposto W5 X		
Resistência matriz rochosa	Extrem. branda Unha 0	Muito branda Navalha 1 X	Branda Ponta do martelo 2	Média Golpe de martelo 3	Dura + 1 golpe de martelo 4	Muito dura Vários golpes martelo 5 X	Extrem. Dura Risca 6
Ângulo atrito	> 45°	40° - 45°	35° - 40°	30° - 35°	<30°		
Esboço (orientado)							Amostras:
							Sem amostras
							

Anexo III

Anexo III – Listagem das amostras recolhidas, sua localização e indicação dos principais ensaios realizados

Litologia	Localização	Caracterização de solos							Amostra nº
		granulometria	W _L , W _p e L _s	DRX	FRX	corte direto	edom.	expans.	
Saprólito cinzento cascalhento	Seminário N38° 00' 38,74'' W007° 51' 20,18''	x	x	x	x				1
Saprólito com mt caliço	Salgueiro Maia N38° 00' 21,86'' W007° 51' 34,80''	x	x	x					2
Saprólito cinzento	Tenente Valadim N38° 00' 44,59'' W007° 51' 59,65''	x	x	x					3
Saprólito com muito caliço	Rotunda Ecomarché N38° 00' 12,98'' W007° 51' 59,65''	x	x						4
Saprólito castanho	Bairro do Pelame N38° 00' 52,19'' W007° 51' 03,01''	x	x						5
Saprólito com caliço	Escola D. Manuel I A N38° 00' 44,41'' W007° 52,009'	x	x	x					6
Saprólito cinzento	Escola D. Manuel I B N38° 00' 26,89'' W007° 51' 57,58''	x	x	x	x				7

Litologia	Localização	Caracterização de solos							Amostra nº
		granulometria	W _L , W _p e L _s	DRX	FRX	corte direto	edom.	expans.	
Saprólito cinzento	Castelo Beja N38° 01' 06,37'' W007° 52' 06,22''	x	x	x					8
Saprólito cinzento	ESTIG estação N38° 01' 03,77'' W007° 51' 34,68''	x	x						9
Saprólito cinzento	Mira Serra (Sousa Porto) N38° 00' 48,34'' W007° 51' 15,01''	x	x						10
Saprólito cinzento	Cemitério N38° 01' 13,49'' W007° 52' 12,35''	x	x	x					11
Saprólito cinzento	Escola Sta Maria N38° 01' 9,96'' W007° 51' 44,93''	x	x	x	x				12
Saprólito cinzento	Escola Santiago Maior N38° 01' 07,88'' W007° 52' 30,17''	x	x						13
Saprólito cinzento	Obra RTS (parque industrial) N38° 01' 40,44'' W007° 51' 25,01''	x	x	x	x				14
Saprólito cinzento	Pilarsol N38° 00' 19,69'' W007° 51' 32,20''	x	x						15

Litologia	Localização	Caracterização de solos							Amostra nº
		granulometria	W _L , W _p e L _s	DRX	FRX	corte direto	edom.	expans.	
Solo com caliço	Caliço Beringel N38° 03' 27,73'' W007° 58' 41,75''			x					16
Barros de Beja castanho escuro	Canal adução N38° 02,965' W007° 57,646'	x	x	x			x		17
Barros de Beja castanho escuro	Canal adução N38° 02,960' W007° 57,637'	x	x	x	x		x		18
Barros de Beja castanho escuro	Canal adução N38° 02,962' W007° 57,640'						x		19
Barros de Beja castanho escuro	Limite COBA N37° 59,304' W007° 53,587'	x	x	x		x	x	x	20
Barros de Beja castanho escuro	Salgueiro Maia N38° 00,1946' W007° 51,337'						x		21
Barros de Beja castanho escuro	Variante N38° 1,058' W007° 52,8231'	x	x	x	x	x	x	x	22
Barros de Beja castanho escuro	Ribeira - N38° 1,323' W007° 54,275'	x	x	x	x	x	x	x	23
Barros de Beja castanho escuro	Auto estrada - N38° 02,610' W007° 56,098'	x	x						24

Litologia	Localização	Caracterização de solos							Amostra nº
		granulometria	W _L , W _p e L _s	DRX	FRX	corte direto	edom.	expans.	
Barros de Beja castanho escuro	Junto RTS - N38° 01,619' W007° 51,419'	x	x						25
Barros de Beja castanho escuro	Estrada p/ Beringel - N38° 02,405' W007° 56,505'	x	x						26
Barros de Beja	Pedreira Beja/ Beringel - N38° 02,192' W007° 56,125'	x	x						27
Barros de Beja castanho escuro	Barragem dos Cinco Reis -N38° 00,767' W007° 56,204'	x	x						28
Barros de Beja castanho escuro	Frente ao RI1 -N37° 59,860' W007° 52,211'	x	x						29
Barros de Beja castanho escuro	Cemitério - N38° 01,308' W007° 52,328'	x	x						30

Litologia	Localização	Caracterização de rochas							Amostra nº
		DRX	FRX	Ultrassons	RCU	RTB	PLT	R _L	
Gabro cinza	Canal de adução N38° 02,869' W007° 57,785'	x	x	x	x	x	x	x	31
Gabro cinza	Saibreira N38° 01,809' W007° 51,947'	x	x	x	x	x	x	x	32
Granodiorito cinza claro	Colina do Carmo N38° 01,671' W007° 51,086'								33
Gabro cinza	Patronato N38° 01,210' W007° 51,900'								34
Gabro cinza	Tanque dos Cavalos N37° 59,946' W007° 50,034'						x	x	35

Anexo IV

Anexo IV – Geometria dos provetes de rocha ensaiados

Peso volúmico e porosidade

GPS	PROVETE	Altura - h			Altura média - h		Diâmetro - D		MASSA - m
		(mm)			(mm)	(m)	(mm)	(m)	(g)
31	1 A 1 2	11,65	11,60	12,00	11,75	0,01175	54,30	0,05430	78,43
	1 A 2 3	10,75	11,45	10,90	11,03	0,01103	54,00	0,05400	73,64
	1 A 2 4	10,35	10,15	10,25	10,25	0,01025	54,20	0,05420	68,41
	1 A 3 3	11,30	11,50	11,65	11,48	0,01148	54,20	0,05420	76,54
	1 A 3 4	10,15	10,05	10,00	10,07	0,01007	54,20	0,05420	67,32
	1 A 3 5	10,65	10,55	10,60	10,60	0,01060	54,30	0,05430	70,99
	1 A 4 2	13,90	13,75	13,75	13,80	0,01380	54,15	0,05415	93,22
	1 A 4 3	11,10	11,20	11,35	11,22	0,01122	54,20	0,05420	75,27
	1 A 5 1	10,25	10,25	10,40	10,30	0,01030	54,20	0,05420	68,91
	1 A 6 2	11,40	11,60	11,30	11,43	0,01143	54,30	0,05430	75,79
	1 A 6 3	11,45	11,60	11,50	11,52	0,01152	54,15	0,05415	77,27
	1 A 6 4	10,30	10,25	10,30	10,28	0,01028	54,20	0,05420	68,89
	1 A 7 2	13,95	13,85	13,70	13,83	0,01383	54,30	0,05430	93,25
	1 A 7 3	9,20	9,50	9,05	9,25	0,00925	54,15	0,05415	61,52
	1 A 9 1	8,15	8,10	8,15	8,13	0,00813	54,15	0,05415	54,35
	1 A 10 1	15,10	15,15	15,25	15,17	0,01517	54,20	0,05420	101,41
	1 B 1 2	12,50	12,45	12,60	12,52	0,01252	54,00	0,05400	83,03
	1 B 1 3	12,05	12,10	12,10	12,08	0,01208	54,00	0,05400	79,18
	1 B 2 2	9,50	9,50	9,65	9,55	0,00955	54,20	0,05420	63,60
	1 B 2 3	8,50	8,50	8,60	8,53	0,00853	54,00	0,05400	56,57
	1 C 1 4	9,85	9,90	9,90	9,88	0,00988	54,20	0,05420	66,48
	1 C 3 3	13,50	13,60	13,60	13,57	0,01357	54,20	0,05420	89,35
	1 C 4 2	9,10	9,10	9,05	9,08	0,00908	54,05	0,05405	94,17
	1 D 1 3	9,00	8,70	8,90	8,87	0,00887	54,00	0,05400	57,97
	1 D 2 3	11,65	11,65	11,90	11,73	0,01173	54,00	0,05400	77,63
	1 D 2 4	10,35	10,00	10,10	10,15	0,01015	54,20	0,05420	67,39
	1 D 2 5	12,30	12,45	12,30	12,35	0,01235	54,20	0,05420	82,40
	1 D 3 1	10,85	10,80	10,90	10,85	0,01085	54,25	0,05425	73,15
	1	11,55	11,55	11,45	11,52	0,01152	54,20	0,05420	76,89
	2	11,40	11,40	11,40	11,40	0,01140	54,15	0,05415	76,31

GPS	PROVETE	Altura - h			Altura média - h		Diâmetro - D		MASSA - m (g)
		(mm)			(mm)	(m)	(mm)	(m)	
32	4 A 1 3	10,45	10,55	10,50	10,50	0,01050	54,05	0,05405	71,40
	4 A 1 4	10,55	10,55	10,50	10,53	0,01053	54,05	0,05405	71,51
	4 A 3 1	11,75	11,65	12,00	11,80	0,01180	54,15	0,05415	79,37
	4 A 3 2	14,30	14,90	14,35	14,52	0,01452	54,15	0,05415	98,71
	4 B 1 0	18,40	19,20	18,05	18,55	0,01855	54,20	0,05420	122,25
	4 B 2 2	10,40	10,70	10,25	10,45	0,01045	54,10	0,05410	70,59
	4 B 2 3	11,35	11,90	11,60	11,62	0,01162	54,15	0,05415	78,89
	4 C 1 2	12,75	12,70	12,75	12,73	0,01273	54,15	0,05415	83,01
	4 C 1 3	12,50	12,50	12,50	12,50	0,01250	54,20	0,05420	81,57
	4 C 2 2	13,35	13,25	13,30	13,30	0,01330	54,15	0,05415	88,95
	4 C 2 3	9,25	9,65	9,40	9,43	0,00943	54,15	0,05415	62,97
	4 C 3 2	10,55	10,70	10,65	10,63	0,01063	54,15	0,05415	71,94
	4 F 2 1	11,50	11,35	11,40	11,42	0,01142	54,20	0,05420	74,90
	4 F 2 2	11,10	11,20	11,10	11,13	0,01113	54,30	0,05430	72,67
	4 G 3 0	12,40	11,30	12,90	12,20	0,01220	54,10	0,05410	80,18
	4 G 3 1	9,60	9,35	9,65	9,53	0,00953	54,10	0,05410	63,42
	4 G 3 2	9,75	10,70	10,95	10,47	0,01047	54,10	0,05410	70,71
	4 G 3 3	12,30	12,05	12,10	12,15	0,01215	54,15	0,05415	81,37
	4 G 4 1	13,55	13,35	12,90	13,27	0,01327	54,10	0,05410	91,69
	4 G 4 2	12,55	12,75	12,90	12,73	0,01273	54,00	0,05400	83,58
	4 G 5 3	11,35	11,50	11,90	11,58	0,01158	54,05	0,05405	78,16
	4 G 5 4	10,00	10,25	10,00	10,08	0,01008	54,10	0,05410	68,34
	4 G 5 5	10,30	10,55	10,10	10,32	0,01032	54,30	0,05430	69,42
	4 G 6 1	12,60	12,65	12,45	12,57	0,01257	54,10	0,05410	82,58
	4 G 7 2	12,55	12,70	12,60	12,62	0,01262	54,25	0,05425	83,48
	4 G 7 3	6,45	6,55	6,60	6,53	0,00653	54,30	0,05430	41,91
	4 G 8 1	12,05	12,40	12,05	12,17	0,01217	54,15	0,05415	82,25
	4 G 8 2	9,90	10,25	9,90	10,02	0,01002	54,40	0,05440	68,38
	4 G 8 3	9,95	9,90	9,90	9,92	0,00992	54,35	0,05435	67,80
	4 G 9 1	11,35	11,10	11,10	11,18	0,01118	54,35	0,05435	76,05
	4 G 9 2	10,65	10,65	10,65	10,65	0,01065	54,40	0,05440	72,92
	4 G 10 1	11,70	11,75	11,80	11,75	0,01175	54,30	0,05430	80,38
	4 G 10 2	11,15	11,20	11,20	11,18	0,01118	54,35	0,05435	76,88
	4 G 11 4	10,30	10,10	10,25	10,22	0,01022	54,35	0,05435	68,90
	4 G 11 5	10,50	10,75	10,50	10,58	0,01058	54,35	0,05435	71,56
	4 G 11 6	11,10	11,10	11,10	11,10	0,01110	54,35	0,05435	73,85
	4 G 12 2	10,40	10,35	10,35	10,37	0,01037	54,30	0,05430	71,23
	4 G 13 1	12,90	12,60	12,90	12,80	0,01280	54,35	0,05435	86,05
	4 G 13 2	10,95	10,45	10,45	10,62	0,01062	54,30	0,05430	70,51
	4 G 13 3	11,40	11,60	11,20	11,40	0,01140	54,35	0,05435	76,60

Resistência à tração (ensaio brasileiro)

GPS	PROVETE	Diâmetro médio - D	Espessura média - t
		(mm)	(mm)
31	1 A 1 1	54,20	28,58
	1 A 3 1	54,25	29,32
	1 A 3 2	54,18	27,72
	1 A 4 1	54,27	27,00
	1 A 5 1	54,25	28,33
	1 A 5 2	54,15	27,82
	1 A 7 1	54,22	27,67
	1 A 9 1	54,12	28,20
	1 B 2 1	54,35	28,83
	1 B 11	54,05	34,30
	1 C 11	54,15	28,63
	1 C 1 3	54,20	28,35
	1 C 3 1	54,15	29,13
	1 C 32	54,03	28,88
	1 C 41	54,08	30,88
	1 D 21	54,10	31,13
	1 D 41	54,23	27,90
	1 E 11	54,27	29,27

GPS	PROVETE	Diâmetro médio - D	Espessura média - t
		(mm)	(mm)
32	4 A 1 0	54,08	
	4 A 1 1	54,03	26,80
	4 A 1 2	53,75	31,02
	4 B 2 1	54,25	29,18
	4 C 1 1	54,22	29,83
	4 G 5 2	54,18	31,73
	4 G 7 1	54,28	31,77
	4 G 11 0	54,37	31,12
	4G10	54,22	31,30
	4G21	54,28	32,70
	4 G 11 1	54,38	31,22
	4 G 11 2	54,35	29,10
	4 G 12 1	54,37	30,82
	4 G 14 1	54,37	29,60
	4 G 14 2	54,37	30,50

GPS	PROVETE	Diâmetro médio - D	Espessura média - t
		(mm)	(mm)
32 W ₂	4 C 2 1	54,27	31,97
	4 C 3 1	54,18	32,52
	4 C 40	54,25	32,48
	4 C 41	54,25	32,07
	4 F 11	54,25	30,57
	4 G 1 2	54,28	32,08
	4 G 5 0	54,08	31,40
	4 G 5 1	54,08	30,73
	4 G 6 0	54,03	29,33
	4 G 11 3	54,37	31,97

Compressão pontual

Amostra 31 (W ₁)	P (kN)	L (mm)	W (mm)	D (mm)	A (mm ²)	De2	De
1	23,89	51,8	47,46	45	2135,70	2720,64	52,16
2	30,32	50,64	67,57	45,67	3085,92	3931,11	62,70
3	21,89	40,97	46,6	38,93	1814,14	2311,00	48,07
4	8,215	41,42	50,02	36,3	1815,73	2313,03	48,09
6	21,055	29,51	53,83	41,85	2252,79	2869,79	53,57
8	22,9	52,96	42,35	40,71	1724,07	2196,27	46,86
9	19,54	45,49	57,18	33,61	1921,82	2448,18	49,48
10	29,46	59,32	61,09	31,11	1900,51	2421,03	49,20
12	9,895	43,15	63,05	48,12	3033,97	3864,92	62,17
13	16,72	37,03	61,5	27,03	1662,35	2117,64	46,02
14	20,3	50,56	62,76	40,41	2536,13	3230,74	56,84

Amostra 35 (W ₁)	P (kN)	L (mm)	W (mm)	D (mm)	A (mm ²)	De2	De
1	45,06	64	59,5	56,25	3346,88	4263,54	65,30
2	42,85	44,8	63,66	44,9	2858,33	3641,19	60,34
3	2,28	32,7	52,16	39,47	2058,76	2622,62	51,21
4	35,86	55,93	52,63	51,76	2724,13	3470,23	58,91
5	6,9	32,17	48,8	47,61	2323,37	2959,70	54,40
6	22,16	53,25	53,76	45,43	2442,32	3111,23	55,78
7	33,83	30,96	59	52,73	3111,07	3963,15	62,95
9	34,1	47,41	54,14	49,35	2671,81	3403,58	58,34
10	2,31	50	63,54	59,67	3791,43	4829,85	69,50
11	22,93	40,08	70,58	49,25	3476,07	4428,11	66,54

Amostra 35 (W ₃)	P (kN)	L (mm)	W (mm)	D (mm)	A (mm ²)	De2	De
1	1,44	50,44	90,88	45,03	4092,33	5213,15	72,20
2	1,97	71,65	66,94	62,15	4160,32	5299,77	72,80
3	12,895	53,28	72,91	77,18	5627,19	7168,40	84,67
4	0,245	50,28	65,02	51,2	3329,02	4240,79	65,12
5	2,305	30,79	112,09	35,1	3934,36	5011,92	70,79
6	3,395	49,75	111,59	43,49	4853,05	6182,23	78,63
7	30,44	35,93	86,11	43,44	3740,62	4765,12	69,03
8	2,285	29,01	51,95	53,84	2796,99	3563,04	59,69
9	0,4	57,13	38,88	87,79	3413,28	4348,12	65,94
10	2,49	46,25	66,27	71,98	4770,11	6076,58	77,95
11	3,175	54,27	44,85	52,81	2368,53	3017,23	54,93
12	7,885	44,71	71,05	78,47	5575,29	7102,28	84,28

Resistência à compressão uniaxial

Amostra	Provete	L	D	A	v	m
		(m)	(m)	(m ²)	(m ³)	(kg)
31	1 A 1 0	0,1382	0,05424	0,00231	0,00031925	0,9274
	1 A 2 0	0,1365	0,05430	0,00232	0,00031610	0,9134
	1 A 3 0	0,1365	0,05420	0,00231	0,00031494	0,9133
	1 A 4 0	0,1370	0,05412	0,00230	0,00031500	0,9157
	1 A 5 0	0,1382	0,05428	0,00231	0,00031972	0,9245
	1 A 6 0	0,1372	0,05413	0,00230	0,00031577	0,9152
	1 A 7 0	0,1365	0,05422	0,00231	0,00031505	0,9178
	1 A 8 0	0,1367	0,05420	0,00231	0,00031540	0,9149
	1 A 9 0	0,1380	0,05415	0,00230	0,00031785	0,9231
	1 A 10 0	0,1347	0,05408	0,00230	0,00030941	0,8991
	1 B 1 0	0,1384	0,05413	0,00230	0,00031853	0,9230
	1 B 2 0	0,1378	0,05427	0,00231	0,00031864	0,9207
	1 C 1 0	0,1380	0,05413	0,00230	0,00031769	0,9281
	1 C 2 0	0,1363	0,05412	0,00230	0,00031339	0,9155
	1 C 2 1	0,1344	0,05422	0,00231	0,00031024	0,9052
	1 C 3 0	0,1381	0,05412	0,00230	0,00031755	0,9330
	1 C 4 0	0,1388	0,05413	0,00230	0,00031945	0,9335
	1 D 3 0	0,1383	0,05418	0,00231	0,00031882	0,9285
	1 D 4 0	0,1381	0,05418	0,00231	0,00031851	0,9255
Total 21	1 E 10	0,1382	0,05417	0,00230	0,00031835	0,9232
	1 E 20	0,1376	0,05423	0,00231	0,00031794	0,9226

Amostra	Provete	L	D	A	v	m
		(m)	(m)	(m ²)	(m ³)	(kg)
32	4 A 2 0	0,1358	0,05418	0,00231	0,00031309	0,9247
	4 C 1 0	0,1382	0,05417	0,00230	0,00031835	0,9234
	4 C 2 0	0,1369	0,05418	0,00231	0,00031555	0,9234
	4 C 3 0	0,1374	0,05420	0,00231	0,00031705	0,9230
	4 F 1 0	0,1386	0,05418	0,00231	0,00031966	0,9134
	4 F 2 0	0,1385	0,05422	0,00231	0,00031982	0,9148
	4 G 2 0	0,1355	0,05422	0,00231	0,00031270	0,9265
	4 G 4 0	0,1367	0,05415	0,00230	0,00031470	0,9308
	4 G 7 0	0,1349	0,05433	0,00232	0,00031270	0,9244
	4 G 8 0	0,1380	0,05432	0,00232	0,00031981	0,9385
	4 G 9 0	0,1390	0,05435	0,00232	0,00032248	0,9448
	4 G 10 0	0,1379	0,05435	0,00232	0,00031985	0,9350
	4 G 12 0	0,1401	0,05433	0,00232	0,00032483	0,9511
Total 15	4 G 13 0	0,1433	0,05433	0,00232	0,00033221	0,9818
	4 G 14 0	0,1415	0,05433	0,00232	0,00032812	0,9576